

La fin des certitudes?

Philippe Renard

Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel,
11 Rue Emile Argand, CH-2007 Neuchâtel, Suisse
philippe.renard@unine.ch

RESUME

2006 fut l'année anniversaire des 150 ans de la naissance de l'hydrogéologie quantitative. La théorie des variables régionalisées, ou géostatistique, est beaucoup plus jeune mais a eu un impact majeur. Aujourd'hui, tout étudiant manie avec brio le krigeage que ce soit pour cartographier une contamination, un champ de transmissivité, ou le toit d'une nappe. Mais la géostatistique n'est pas seulement cela. Son intérêt majeur réside non pas dans l'interpolation des paramètres mais dans la possibilité qu'elle offre au praticien de modéliser une incertitude. Que celle-ci concerne les paramètres physiques ou les forçages d'un système comme la recharge. On constate actuellement que cette façon d'utiliser la géostatistique reste cantonnée au monde académique alors que c'est dans la pratique que la gestion des risques est primordiale. Pourquoi donc les praticiens n'utilisent pas ces outils stochastiques ? Les raisons sont diverses. Elles comprennent des aspects liés au marché du conseil en hydrogéologie, des raisons techniques comme le manque de logiciels largement distribués, mais aussi un certain nombre de mécompréhensions liés à l'éducation des hydrogéologues. Changer cette situation nécessite d'agir à différents niveaux. Tout d'abord le législateur et l'administration doivent être convaincus de l'intérêt de l'approche. Ensuite, le potentiel économique de l'hydrogéologie stochastique doit être démontré auprès des clients. L'adéquation des théories avec les problèmes pratiques réels doit être améliorée. Enfin, des logiciels, des jeux de données, et une infrastructure de calcul doivent devenir largement accessibles. Tels sont les défis qu'il s'agit de relever dans les années qui viennent.

MOTS CLES

Modélisation, Géostatistique, Simulation, Application

1. Introduction

Parmi toutes les applications environnementales de la géostatistique, l'hydrogéologie stochastique est devenue un domaine quasiment indépendant durant les trente dernières

années. L'hydrogéologie stochastique est la partie de l'hydrogéologie qui traite des équations aux dérivées partielles stochastiques qui décrivent les processus liés à l'eau souterraine. Les solutions de ces équations se présentent en général sous forme de loi de probabilité jointes pour tous les paramètres (transmissivité, emmagasinement, conductivité thermique, etc.) et toutes les variables d'états (charge hydraulique, concentration d'un polluant, température, etc.) qui apparaissent dans ces équations. Les techniques existant pour trouver ces solutions vont de méthodes purement analytiques à des méthodes purement numériques. Toutefois, en dépit du nombre important de publications dans les meilleurs journaux internationaux et de l'existence de plusieurs livres de cours (DAGAN 1989; GELHAR 1993; KITANIDIS 1997; RUBIN 2003; ZHANG 2002), l'hydrogéologie stochastique n'est toujours pas utilisée en routine par les professionnels (DAGAN 2002; ZHANG & ZHANG 2004). Cet état de fait est d'autant plus étonnant que d'autres domaines d'applications comme l'ingénierie pétrolière, la dynamique des fluides, la météorologie, ou l'hydrologie de surface ont depuis longtemps adoptés dans la pratique les techniques stochastiques (CHRISTAKOS 2004) même si ce point est discuté par d'autres auteurs (PAPPENBERGER & BEVEN 2006).

Un point important à clarifier avant d'entrer dans la discussion est de distinguer l'aspect purement scientifique et pratique de l'hydrogéologie stochastique. La partie purement scientifique a comme objectif de comprendre l'impact de l'hétérogénéité du milieu naturel sur la physique des processus hydrogéologiques. Des exemples typiques de travaux dans cette direction concerne la recherche de lois effectives et de paramètres équivalents pour des milieux composites (RENARD & DE MARSILY 1997; RENARD et al. 2000). D'un point de vue pratique, l'objectif est de prévoir les conséquences de l'hétérogénéité (et de l'incertitude qui en découle) sur la conception d'ouvrage et la gestion des ressources. Les deux faces sont intimement liées. Par exemple, une amélioration dans la compréhension et le calcul de paramètres équivalents a un impact importants sur les techniques (et le logiciels) de simulation utilisés par les praticiens (LUNATI & JENNY 2006).

Le but principal de cet article est de susciter un débat entre les praticiens et les théoriciens et ainsi de tenter de rapprocher ces deux communautés. Plus précisément il s'agit de discuter les points suivants : Qu'est ce que l'hydrogéologie stochastique ? Est-ce un domaine très actif de la recherche en hydrogéologie ? Est-ce que les méthodes stochastiques ne sont pas utilisées en pratique ? Si oui, est-ce seulement un problème de formation et de transfert de connaissance ? Quelles sont finalement les raisons de cette situation ? Est-il possible d'agir pour la changer ?

2. L'émergence de l'hydrogéologie stochastique

La naissance de l'hydrogéologie quantitative est généralement associée à la publication de l'ouvrage « Les fontaines de la ville de Dijon » (DARCY 1856) qui contenait la première description d'une loi gouvernant le flux d'eau à travers un milieu poreux. De façon surprenante, la même année, quelques temps avant DARCY, PARAMELLE publiait un ouvrage intitulé « L'art de découvrir les sources » (PARAMELLE 1856). Dans son ouvrage, DARCY

établissait les bases de l'hydrogéologie quantitative. Pour sa part, Paramelle établissait à sa façon les bases de l'hydrogéologie descriptive. Le livre de PARAMELLE est un livre de naturaliste, il compare des centaines de sites en France et les conditions sous lesquelles il est probable de trouver de l'eau à faible profondeur. Ses critères sont géomorphologiques et géologiques. A l'époque le livre de PARAMELLE a été un grand succès populaire, il a été réédité à plusieurs reprises, ce qui n'a pas été le cas pour l'ouvrage de DARCY.

Pendant les cinquante années qui suivirent, l'hydrogéologie quantitative traita essentiellement de la dérivation des lois physiques de bases, et de leurs solutions analytiques. La plupart des travaux étaient focalisés sur les flux d'eau souterraine en milieu poreux et supposait un écoulement permanent. Cette hypothèse n'a commencé à être éliminée qu'avec les travaux de THEIS (1935). Si l'on feuillette les actes du 100^{ème} anniversaire de la publication de la loi de Darcy (A.I.S.H 1956), on s'aperçoit qu'avant 1956 l'essentiel de la recherche traitait de problème d'écoulement et utilisait des méthodes analytiques et des expressions simplifiés. Le milieu souterrain était supposé homogène (paramètres constants), c'était la seule façon de pouvoir résoudre analytiquement les équations et de les utiliser en pratique. Dans les cinquante années suivantes (entre 1956 et 2006), l'hydrogéologie a évolué d'une façon spectaculaire. Tout d'abord, les problèmes théoriques liés aux écoulements sont devenus d'une certaine façon marginaux, les développements les plus importants ont concerné le transport de soluté et les problèmes de pollution d'eau souterraine. Dans le début des années 1960, des méthodes numériques capable de gérer l'hétérogénéité (paramètres variables dans l'espace) ont commencé à être appliqués pour simuler l'écoulement et le transport (WARREN & PRICE 1961). De nouveaux concepts ont du être développés pour modéliser tout d'abord le transport de soluté conservatif. Puis ces modèles ont rapidement évolué pour inclure la sorption, la dégradation, la décroissance radioactive, et les réactions géochimiques. En parallèle, alors que l'hétérogénéité ne semblait pas trop problématique pour les problèmes d'écoulement, il apparut qu'elle exerçait un contrôle majeur sur les lignes d'écoulements et sur les problèmes de transport. Un outil mathématique devint nécessaire pour modéliser l'hétérogénéité, pour la cartographier, et pour modéliser son impact sur l'écoulement et le transport. THEIS (1967) indiquait "Je considère comme certain le fait que nous ayons besoin d'un nouveau modèle conceptuel, contenant les hétérogénéités connues d'un aquifère naturel pour expliquer les phénomènes d'écoulement et de transport." Les ingénieurs pétroliers faisaient face aux mêmes difficultés.

A peu près dans la même période, la géostatistique commença à devenir une théorie bien établie grâce au travail de MATHERON (1962; 1965). Il est important de rappeler que Matheron commença à développer la théorie des variables régionalisées dans les années 1950, essentiellement pour des applications minières, mais il montra très tôt un intérêt pour les applications des méthodes stochastiques à l'étude des écoulements et du transport en milieu poreux hétérogènes (DELHOMME & DE MARSILY 2006; MATHERON 1966; MATHERON 1967; MATHERON & DE MARSILY 1980).

En 1975, FREEZE publie le premier article qui analyse un problème d'écoulement à une dimension en milieu poreux hétérogène (FREEZE 1975). Le modèle est extrêmement simple, les perméabilités sont constantes par intervalle de même longueur et leurs valeurs

sont tirées aléatoirement et indépendamment dans une distribution log-normale. FREEZE utilise la méthode Monte-Carlo pour analyser en détail les premiers moments de la charge hydraulique. Il étend l'étude à un problème de consolidation transitoire. En dépit du fait que l'étude de Freeze ne soit pas la première ayant appliquée les méthodes stochastiques au problème de l'écoulement en milieu poreux (MATHERON 1966; WARREN & PRICE 1961), il s'agit de la première publication parue dans un journal dédiée à l'hydrogéologie et elle a eu un impact retentissant. Dès sa publication, elle est l'objet de débat (DAGAN 1976; FREEZE 1977; GELHAR et al. 1977) et elle inspire de nombreux autres chercheurs qui s'attaquent à la généralisation des premiers résultats de FREEZE : écoulement dans des domaines de dimension 2 ou 3 (BAKR et al. 1978), analyse stochastique des forçages (Sagar 1978), premières simulations conditionnelles (DELHOMME 1979), etc. Il serait trop long ici de faire un historique complet de l'histoire de l'hydrogéologie stochastique. En revanche, le lecteur intéressé pourra se référer à quelques articles de synthèse récents (CARRERA et al. 2005; CHILES 2001; DAGAN 1986; DAGAN 2002; DE MARSILY et al. 2005; DELHOMME & DE MARSILY 2006; GELHAR 1986; GUTJAHR & BRAS 1993; NEUMAN 1984; ZHANG & ZHANG 2004).

3. Pourquoi s'intéresser à l'hydrogéologie stochastique ?

La pratique hydrogéologique est diverse : implantation de puits de pompage, calcul de réserve disponible, conception de puits d'alimentation en eau potable, conception de systèmes de décontamination des eaux souterraines, gestion des aquifères, conception de système d'assèchement de fouilles, etc. Dans tous ces projets, l'approche utilisée par les professionnels est la même. Ils collectent les informations permettant de caractériser la géométrie et les propriétés du sous-sol. Les valeurs des variables d'état sont mesurées et analysées pour comprendre le fonctionnement du système hydrogéologique. Sur la base de cette compréhension, un modèle conceptuel est bâti, parfois un modèle numérique. Ce dernier est calibré. Dans certains cas, les paramètres du modèle sont optimisés de façon à ce que le modèle reproduise au mieux les mesures effectuées (ALCOLEA et al. 2006). Enfin, le modèle est utilisé pour effectuer des prévisions et optimiser (de façon générale) des variables de décisions (position d'un puits, débits pompés, quantité de solvants, etc.) en fonction d'une certaine fonction objectif (débit maximum, contamination minimum, meilleure qualité de l'eau, coût d'exploitation minimum, etc.) et dans le cadre d'un ensemble de lois et de règlements qui contraignent le problème d'optimisation.

Dans tous ces projets, il existe une part considérable d'incertitude. Par exemple : la position des limites entre aquifère et aquitard est seulement observée en un nombre limité de forages, les propriétés du sol et de roches sont mesurées seulement dans quelques points, l'évolution temporelle des termes sources comme la recharge ou le relâchement d'un contaminant n'est estimée qu'indirectement, une fracture majeure est observée dans un tunnel et son extension n'est pas connue précisément, etc. Une revue plus exhaustive des différentes sources d'incertitudes lors de la modélisation d'un problème de transport est proposée par CARRERA (1993). Ainsi, il est clair que dans la plupart des situations

pratiques, les professionnels ont à gérer une incertitude importante résultant d'un échantillonnage partiel d'un milieu souterrain complexe. Selon WINTER (2004) "toutes les applications importantes de l'hydrogéologie sont intrinsèquement incertaines ... les seules situations dans lesquelles un modèle déterministe est réellement approprié sont essentiellement académiques".

D'un point de vue pratique la quantification de l'incertitude est importante pas seulement pour estimer un risque mais surtout parce que c'est la seule façon de prendre des décisions rationnelles dans un contexte incertain. Le point qu'il faut garder à l'esprit est que toute prise de décision est liée à des pertes économiques potentielles qui sont rarement symétriques. La décision optimale ne correspond alors quasiment jamais à la valeur moyenne. Trouver un volume moyen de contaminant ne permet pas de prendre une décision optimale si le surcoût dû à une surestimation n'est pas identique au surcoût due à une sous estimation de ce volume. Pour trouver l'optimum en terme de perte économique, il faut disposer de la distribution de probabilité complète de la variable d'intérêt (Srivastava 1990).

Pour toutes ces raisons, l'hydrogéologie stochastique a un rôle important à jouer dans la pratique.

4. Quelle est la situation actuellement ?

4.1 Du point de vue de la recherche

Comprendre la situation de l'hydrogéologie stochastique nécessite d'analyser l'état de la recherche. Il est généralement accepté que l'hydrogéologie stochastique est un domaine actif avec une grande quantité de connaissances accumulées. Toutefois, si l'on fait une recherche bibliographique dans l'une des bases de données de publications scientifiques les plus reconnues (ISI Web of knowledge: <http://isiknowledge.com>), et si l'on sélectionne les publications dont le titre contient des mots s'apparentant au domaine de l'hydrogéologie et des méthodes stochastiques – la requête exacte était [titre contient (geostat* ou spatial statistics ou stochastic) et (groundwater ou hydrogeol* ou aquifer)] – on obtient seulement quelques publications chaque année (Fig. 1a). Ce nombre augmente légèrement au cours des années mais reste en dessous de 20 publications par an. Si l'on compare ce nombre à tous les articles qui ne contiennent que les mots (groundwater ou hydrogeol* ou aquifer) dans leur titre, on trouve que la proportion d'article traitant de méthode stochastique est faible (environ 1% en moyenne) par rapport à l'ensemble des articles en hydrogéologie (Fig. 1b). Pour étudier la sensibilité de ses résultats à la façon dont la recherche bibliographique est menée, on peut rajouter des mots clefs comme porous, fractured, subsurface, pour chercher les articles traitant d'hydrogéologie et des mots clefs comme probability ou statistical pour chercher les articles utilisant des méthodes stochastiques. Ainsi, on augmente considérablement le nombre d'articles trouvés mais la proportion d'article traitant d'hydrogéologie stochastique diminue (autour de 0.5%). On peut également élargir la recherche en sélectionnant les articles qui contiennent les mots clefs

cités précédemment dans le titre, le résumé, ou les mots clefs et pas seulement dans le titre. Dans ce cas le nombre d'articles augmente d'un ordre de grandeur (Fig. 1c), mais la proportion (Fig 1d). reste faible (4 %).

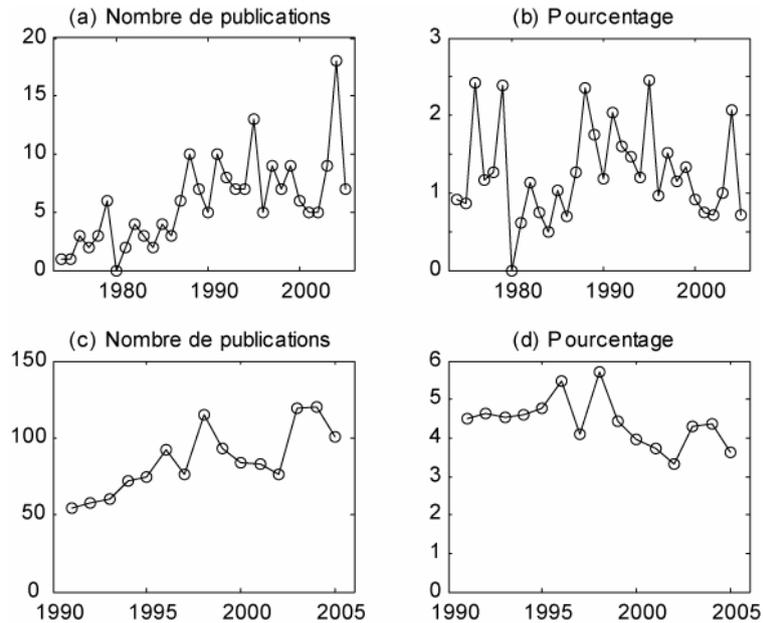


Figure 1: Evolution temporelle du nombre d'articles publiés dans des journaux internationaux qui mentionnent les mots [(geostat* or spatial statistics or stochastic) and (groundwater or hydrogeol* or aquifer)] dans leur titre (a et b) ou dans leur titre, résumé, ou mots-clefs (c et d). Les pourcentages (figs. b et c) représentent les mêmes valeurs normalisées par le nombre total de publications contenant seulement les mots [groundwater or hydrogeol* or aquifer] (Source : ISI Web of Knowledge)

Bien sur, les statistiques présentées dans la figure 1 ne sont que des indicateurs approximatifs. Ils proviennent d'une seule base de donnée, les mots choisis ne sont pas nécessairement suffisant pour sélectionner tous les articles du domaine, ces mots risquent aussi d'aboutir à la sélection d'articles hors du domaine. Mais il serait très laborieux de faire une vérification systématique manuelle. Néanmoins, ces statistiques indiquent assez clairement que l'hydrogéologie stochastique est une branche mineure de la recherche en hydrogéologie.

La faible quantité de travaux publiés est toutefois compensée par un certain prestige. En effet les articles publiés dans ce domaine apparaissent dans près de 210 journaux différents (Source : ISI Web of Knowledge), mais une vaste majorité (65 %) est publiée dans un petit sous-ensemble des journaux les plus prestigieux en hydrogéologie (tableau 1). Si l'on

présente les mêmes statistiques sous un autre point de vue, en analysant la proportion d'articles d'hydrogéologie stochastique publiés par rapport au nombre total d'articles publiés dans chaque journal, on trouve à nouveau que la proportion est faible (moins de 6% si l'on exclue SERRA qui est un journal spécifiquement dédié aux méthodes stochastiques) même dans ces journaux où se concentre l'essentiel des articles du domaine. Ces chiffres semblent confirmer à nouveau que l'hydrogéologie stochastique représente une part modeste de la recherche en hydrogéologie.

Tableau 1: Classification des journaux en fonction du nombre total n d'articles publiés en hydrogéologie stochastique. Le pourcentage est calculé en divisant n par le nombre total d'articles publiés dans l'ensemble de tous les journaux. La colonne IF présente les facteurs d'impact de ces journaux en 2005. (Source ISI Web of Knowledge)

Nom du Journal	n	%	% cumulé	IF
1. Water Resources Research	432	30	30	1.94
2. Journal of Hydrology	120	8	38	1.74
3. Stochastic Environmental and Risk Assessment	78	5	43	0.70
4. Ground Water	76	5	49	1.68
5. Advances in Water Resources	74	4	54	1.73
6. Journal of Contaminant Hydrology	54	3	57	1.41
7. Mathematical Geology	37	2	60	0.74
8. Transport in Porous Media	33	2	62	0.74
9. Hydrogeology Journal	23	1	64	1.15
10. Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE	19	1	65	1.04

4.2 Du point de vue des professionnels

Le second point qui doit être analysé est l'état de la pratique par les professionnels. Mais tout d'abord, essayons de clarifier ce qu'est un professionnel dans le cadre de cet article. Il s'agit d'un hydrogéologue qui exerce sa profession soit dans une société de conseil, soit dans une administration, soit encore un scientifique qui analyse des systèmes hydrogéologiques mais qui n'est pas un spécialiste des méthodes stochastiques.

Afin d'évaluer si les méthodes stochastiques sont utilisées par les professionnels, la question a été directement posée à 16 hydrogéologues représentant 14 sociétés différentes localisées en Allemagne, Australie, Canada, Etats-Unis d'Amérique, France, Irlande, Italie, Royaume Uni, et Suisse. Les réponses sont plus diverses que prévu. Elles sont différentes en fonctions du pays, de la société, mais aussi au sein de la même société. Globalement, le

constat de DAGAN (2002) est confirmé avec 10 réponses déclarant que les méthodes stochastiques ne sont pas utilisées en pratiques. Une des réponses donne une bonne illustration de ce que beaucoup de professionnels pensent :

« J'irai jusqu'à dire que l'hydrogéologie stochastique n'a eu absolument aucun impact sur la grande majorité des professionnels. »

Toutefois, 6 réponses indiquent que les méthodes stochastiques sont utilisées dans 10 à 50% des études. Ces sociétés répondent qu'elles utilisent les méthodes stochastiques régulièrement, même si ce n'est pas pour la majorité de leur contrat. Parmi elles, des similarités ressortent. Certaines travaillent dans des domaines (gestion des décharges par exemple) ou sont situées dans des pays où la régulation impose des analyses de risque de type stochastique. A nouveau, pour illustrer ce type de situation nous pouvons citer une des réponses reçues :

« Au Royaume Uni, la plupart des hydrogéologues impliqué dans la gestion des déchets et dans une moindre mesure dans la gestion des sites contaminés utilisent l'approche stochastique. »

La même situation a lieu en Irlande, ou en Italie, où la régulation impose un minimum d'étude de risque qui inclue une analyse de Monte Carlo. Il semble ainsi que sous ce type de pression, des logiciels sont développés, les professionnels se forment, et toute la profession adapte ses standards. L'autre situation typique dans laquelle des méthodes stochastiques sont appliqués, c'est lorsque le client risque une perte financière importante. De façon à la minimiser, le client demande une évaluation du risque et est prêt à investir dans l'acquisition de donnée et l'application de méthode stochastique. D'un point de vue technique, il ressort de ce questionnaire que les professionnels utilisent essentiellement la méthode de Monte Carlo couplée à un modèle analytique ou numérique. La méthode FOSM (First Order Second Moment) est mentionnée par une des équipes. Les applications sont diverses allant de problèmes d'alimentation en eau potable jusqu'à des problèmes de génie civil comme la conception de puits horizontaux pour l'injection et la récupération d'eau, la construction de tunnel, ou des problèmes de migration de contaminant.

5. Raison possible pour l'absence d'application

Essayons maintenant de comprendre pourquoi les méthodes stochastiques ne sont pas appliquées en routine. Evidement, il n'y a pas une raison unique mais plutôt un ensemble de raisons qui agissent ensemble. Les raisons sont organisées en quatre groupes principaux : les raisons structurelles, les fausses raisons, les raisons fondamentales, et les raisons techniques. Mais avant d'aller plus loin, j'aimerais traiter de la question du délai nécessaire entre le développement d'une théorie et son application. Si l'on considère que les théories, les méthodes, et les résultats sont déjà disponibles dans la littérature scientifique, on peut penser que ces méthodes et ces résultats vont progressivement diffuser dans la pratique quotidienne. Il suffit d'attendre suffisamment longtemps. Ainsi la méthode des points pilotes a été proposée dans les années 1980 (DE MARSILY 1978), développée

extensivement dans les années 1990 (LAVENUE & DE MARSILY 2001; RAMARAO et al. 1995), et n'est disponible largement que maintenant, vingt ans plus tard dans le logiciel PEST (DOUGHERTY 2004). Un délai de plus de 20 ans pour l'application d'une méthode efficace est particulièrement long si on le compare au délai habituel au bout duquel un brevet passe dans le domaine public qui est de 20 ans. Pourquoi le transfert de technologie pour le même type de méthode se produit beaucoup plus rapidement dans le domaine de l'ingénierie pétrolière ou en météorologie que pour l'hydrogéologie ?

5.1 Les raisons structurelles

L'économie et le droit sont les deux facteurs qui structurent le marché et le travail des professionnels. En effet, la pratique hydrogéologique est dirigée par le marché. Les consultants doivent obtenir des bénéfices pour survivre et ils doivent réaliser des tâches qui sont soit requises par les lois, soit qui aident leurs clients à résoudre des problèmes pratiques. Quand les lois ne requièrent pas l'emploi de méthodes stochastiques et quand les lois sont basées sur le principe de valeurs uniques comme base à la prise de décision (norme de potabilité, temps de transfert pour les zones de protection, etc.), la plupart des professionnels travaillent de façon déterministe. Sous ce type de législation, quand les professionnels doivent donner un avis d'expert, une réponse probabiliste n'est pas acceptable. Ce point est discuté en détail par FREEZE (2004) et SUDICKY (2004). Mais la situation change progressivement (RUBIN 2004; WINTER 2004). C'est le cas aujourd'hui au Royaume Uni où la British Environment Agency recommande l'utilisation de méthodes stochastiques pour l'analyse de risque pour l'étude des sites contaminés ou pour la conception de nouvelles décharges. Poussés par ces textes de lois, les consultants adaptent leurs méthodes, se forment et appliquent les méthodes stochastiques.

D'un point de vue économique, de nombreuses sociétés de conseil indiquent que les budgets pour les études hydrogéologiques sont en baisse. Ainsi les sociétés minimisent leurs tarifs dans un marché très compétitif. La tendance est donc de faire les études plus vite, plus simples, et moins chères. Dans cet environnement, la plupart des sociétés ne prennent pas le risque d'investir dans des techniques stochastiques que peu de sociétés offrent sur le marché. Ayant toutefois à gérer l'incertitude, les professionnels utilisent des méthodes alternatives moins onéreuses comme l'évaluation de scénarios pessimistes ou optimistes. WINTER (2004) argumente que dans beaucoup de cas, surdimensionner une installation (comme un champ captant) coûte moins que de faire une étude stochastique complète. Surdimensionner un ouvrage est une solution économique dans de nombreux cas mais n'est pas toujours une solution applicable. Par exemple, WINTER (2004) décrit les limites de cette approche pour cartographier l'extension d'un nuage de contaminant. Une autre situation dans laquelle ce type d'approche est inadapté se rencontre dans les cas pour lesquels il n'existe pas suffisamment d'expériences permettant de connaître les risques d'échec et donc de définir assez précisément les facteurs de sécurité. Un exemple de problème de ce type est la séquestration profonde de CO₂. On notera également que des méthodes alternatives existent également, comme la logique floue (GUYONNET et al. 1999). Toutefois, ces techniques ne sont également pas encore utilisées en routine.

Les contraintes économiques freinent souvent l'application des méthodes stochastiques, mais l'économie peut aussi être le moteur pour l'application de ces techniques. Les exemples cités dans l'enquête réalisée auprès des professionnels montrent que les études ne résultant pas d'une pression légale sont toutes conduites pour des clients soucieux d'évaluer aussi précisément que possible des pertes financières possibles et importantes résultant d'un manque d'information. Souvent, l'absence d'application de méthodes stochastiques est dû au fait que les gestionnaires n'ont pas conscience des risques économiques liés à une seule investigation déterministe. Pour tenter de changer cette situation, le monde académique doit s'efforcer de publier des exemples concrets d'études stochastiques dans lesquelles les implications économiques sont clairement démontrées (BAYER et al. 2005; BIERKENS 2006; DEMOUGEOT-RENARD et al. 2004; FREEZE et al. 1990; SRIVASTAVA 1990). Ce type d'étude peut alors être utilisé par les professionnels pour démontrer l'intérêt des approches stochastiques à leurs clients.

5.2 Quelques raisons erronées

'Dieu ne joue pas aux dés avec l'Univers'. Cette célèbre citation d'Albert Einstein illustre bien une certaine façon de rejeter en bloc les méthodes stochastiques que ce soit dans le domaine de la physique ou dans le domaine des sciences de la Terre. En fait, cette réaction est essentiellement liée à un malentendu et à une confusion entre l'interprétation objectiviste et subjectiviste du concept de probabilité. Pour beaucoup, le fait que la réalité souterraine soit unique implique qu'il est absurde d'essayer de la modéliser avec un modèle basé sur des fonctions aléatoires. Ce rejet se base sur l'interprétation objectiviste du concept de probabilité qui représente alors une fréquence d'occurrence dans le cadre d'un processus réellement aléatoire comme un jeu de dé ou un mouvement brownien. Cette interprétation nécessite la présence d'un phénomène réellement aléatoire qui sous-tend les observations effectuées et c'est difficilement acceptable pour décrire une structure géologique unique. Dans le modèle subjectiviste qui est en fait celui qui sous-tend l'hydrogéologie stochastique, la probabilité représente le degré de connaissance dont on dispose à un certain moment au cours d'une étude. Par exemple, tant qu'une perméabilité n'est pas mesurée en un certain point, on peut considérer qu'une large gamme de valeurs sont possibles et ont la même probabilité d'occurrence. Après un certain nombre de mesure sur le site, cette gamme se réduira. Enfin, si l'on effectue une mesure en ce point, la probabilité se réduira à zéro pour toutes les valeurs incompatibles avec la mesure. En d'autres termes, l'hydrogéologie stochastique ne suppose en aucun cas que le sous-sol est aléatoire. Elle suppose uniquement que le sous-sol est partiellement inconnu et que le manque de donnée nécessite l'utilisation de techniques probabilistes pour quantifier l'incertitude correspondante. Certainement qu'une des causes importantes de cette confusion tient dans la manière (essentiellement objectiviste) dont les statistiques sont enseignées aux étudiants en science. Un effort d'éducation des futurs hydrogéologues dans ce domaine semble donc être une priorité importante. De plus, enseigner uniquement les fondements théoriques est certainement très insuffisant. Le défi est de rendre ces techniques compréhensibles et applicables à une vaste majorité des étudiants et des professionnels.

Manque de donnée. Le plus souvent, les professionnels doivent fournir une réponse sans avoir le budget suffisant pour acquérir un jeu de donnée suffisant. Cela aboutit au paradoxe suivant : quand peu de donnée sont disponibles et que l'incertitude est maximum, les professionnels utilisent de préférence un modèle déterministe (Neuman 2004; Rubin 2004). Cela ne signifie pas que les professionnels ne se soucient pas de l'incertitude. Le plus souvent, ils sont très prudents et mettent en valeur le fait que leurs recommandations sont basées sur une quantité limitée de donnée. Ils indiquent habituellement que ces résultats sont soumis certainement à une grande incertitude (non quantifiée). Bien que le manque de donnée soit un problème tout à fait réel, il est trop souvent fait abstraction du fait que des données existent souvent dans d'autres sites similaire dans le monde. L'idée du projet wwhypda (RENARD & COMUNIAN 2006) est de faciliter l'accès à ces données. Cela n'est pas une révolution. NEWELL ET AL (1990) ont déjà bâti une base de données de valeurs typiques de conductivités hydrauliques, de vitesse de filtration, de gradient hydrauliques, etc. à partir d'une enquête réalisée sur 400 sites aux Etats-Unis. Leur objectif était de fournir les données de base pour réaliser des simulations de Monte Carlo afin d'évaluer la sureté de décharges potentielles. D'autres auteurs comme DAGAN (2002; 2004) ou de MARSILY ET AL. (2005) ont aussi défendu l'idée que la communauté des hydrogéologues a besoin d'un catalogue des propriétés statistiques des roches. La différence principale entre les projets précédents et wwhypda et que le projet est construit autour d'un environnement collaboratif ouvert aux contributions de tous les utilisateurs. Il est évident que wwhypda ne remplacera jamais la connaissance des données locales, l'idée est simplement de compléter ces données afin d'améliorer la caractérisation des sites.

5.3 Quelques raisons fondamentales

Inadéquation des théories. Une excellente raison pour ne pas utiliser les théories existantes est de considérer qu'elles sont inadéquates à la réalité. Pour beaucoup de professionnels, le modèle multi-Gaussien usuel est simplement inadéquat et incapable de représenter la variabilité géologique. L'écart entre les modèles géostatistiques et la vision mentale que les géologues ont de la variabilité souterraine les retient d'appliquer ces théories.

Depuis les débuts de l'hydrogéologie, il y a toujours eu ces deux pôles : d'une part les ingénieurs suivant la voie ouverte par Henry Darcy, ils ont travaillé essentiellement en décrivant le sous-sol à l'aide d'équations et de modèles simplifiés, et d'autres part les géologues, suivant la voie ouverte par Paramelle, ils ont développés une connaissance approfondie (et conceptuelle) des structures des aquifères et de leurs comportements. Jusqu'à présent, ces deux approches ont été difficiles à réconcilier. Pour le géologue, les caractéristiques importantes de l'aquifère sont la présence de chenaux, failles, limite, et son travail s'est surtout focalisé sur l'identification de ces éléments sur le terrain à l'aide d'observations directes ou indirectes par méthode géophysique. Pour le modélisateur statisticiens, le défi a été jusqu'à présent essentiellement de trouver des relations aussi générale que possible entre les différents paramètres qui interviennent dans les équations différentielles stochastiques, mais dans la majeure partie des cas, le milieu souterrain est représenté par une fonction aléatoire multi-Gaussienne. Un tel modèle statistique permet de

trouver analytiquement (ou numériquement) des relations importantes qui permettent de comprendre l'impact de l'hétérogénéité et de l'incertitude. Cela est nécessaire mais souvent insuffisant pour traiter les cas réels. Les limites du modèles multi-gaussien ont souvent été mise en évidence dans la littérature (GOMEZ-HERNANDEZ & WEN 1998; JOURNAL & ALABERT 1990; ZINN & HARVEY 2003). Mais la situation change à l'heure actuelle et de nouveaux modèles deviennent disponibles. Ces modèles peuvent être contraints par une connaissance géologique. Au moins trois alternatives méritent d'être mentionnés : la méthode des plurigaussiennes seuillées, les chaîne de Markov à pas continu, la méthode multi-points. Le plus souvent, ces méthodes décompose la simulation en deux étapes : tout d'abord simulation de la distribution spatiale des faciès géologiques, ensuite simulation des valeurs des paramètres à l'intérieur des faciès.

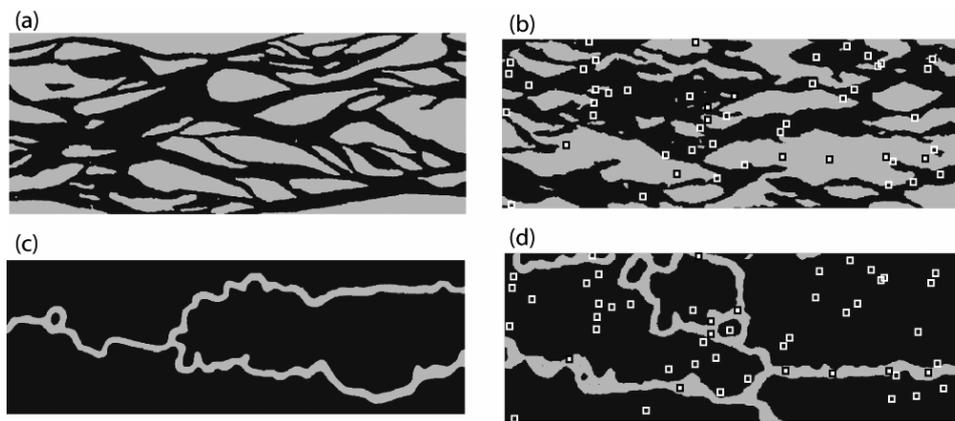


Figure 2: Exemple d'application de la méthode des statistiques multipoints. La colonne de gauche représente deux image d'entraînement correspondant à deux modèles géologiques conceptuels différents : (a) représente un aquifère alluvial anastomosé, et (c) un réseau karstique. La colonne de droite représente deux simulations conditionnelles obtenues respectivement avec les mêmes données conditionnantes (les carrés) mais avec les deux modèles conceptuels différents.

La méthode qui semble la plus prometteuse est la méthode des statistiques multipoints (GUARDIANO & SRIVASTAVA 1993; STREBELLE 2002). Elle va très certainement changer radicalement l'application des méthodes stochastiques en permettant de réconcilier Darcy et Paramelle. Le concept est simple et flexible. Le géologue fournit une image d'entraînement (qui peut être tridimensionnelle) du sous-sol. Cette image représente un modèle conceptuel quantitatif des structures souterraines. Pour en démontrer l'application dans cet article, deux simulations stochastiques ont été générées à l'aide de cette technique (Figures 2b and 2d), pour les mêmes données ponctuelles, mais avec deux modèles

conceptuels différents (Figures 2a and 2c). Le point crucial est que les données ponctuelles observées dans les forages ne permettent pas de distinguer si elles correspondent à un échantillonnage d'un modèle conceptuel ou de l'autre. Supposer que cette information puisse être extraite des seules données de forage et du calcul d'un variogramme est donc incorrect. Cette information doit être fournie par une analyse géologique détaillée et transférée dans le modèle stochastique. Les statistiques multipoints permettent d'effectuer cela. A l'heure actuelle cette méthode a été appliquée en hydrogéologie seulement pour un petit nombre de cas synthétiques (FEYEN & CAERS 2006). Une extension de la méthode pour le cas des variables continues a également été développé (Zhang et al. 2006).

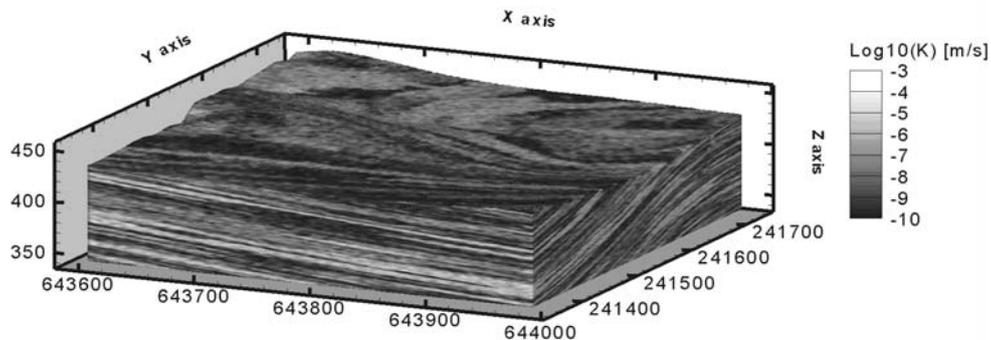


Figure 3: Une simulation stochastique d'un champ de perméabilité (3 millions de mailles) pour un site contaminé en Suisse. La simulation représente un dépôt fluvial contenant 5 lithologies principales (Mariethoz et al. 2006).

Une autre méthode intéressante est la méthode des pluri-gaussiennes seuillées (ARMSTRONG et al. 2001; LE LOC'H et al. 1994). Cette méthode est basée sur des statistiques bi-point. Son avantage principal est qu'elle permet au géologue d'imposer des relations d'ordre entre les faciès. Par exemple, dans le cas du dépôt fluvial, nous avons imposé que les levées soient toujours situées entre les chenaux et les plaines d'inondation, alors que les crevasses pouvaient recouper l'ensemble de ces faciès. MARIETHOZ, ET AL. (2006) ont utilisé ces techniques pour reconstruire les champs de porosité et de perméabilité pour un problème de migration de contaminant. Cette étude a montré qu'un tel modèle donne des résultats radicalement différents de ceux obtenus avec un modèle simplifié homogénéisé.

La liste des techniques permettant de simuler des faciès géologiques réalistes pourrait aisément être complétée (voir par exemple de MARSILY ET AL. 2005), mais le point important qui doit être rappelé ici est que ces outils existent et qu'ils sont capables de représenter les structures importantes et l'architecture interne des aquifères. Cela représente certainement un pas important vers une meilleure acceptation des modèles stochastiques par les professionnels.

Connectivité. Usuellement, la connectivité n'est pas prise en compte directement dans les modèles géostatistiques. Les statistiques multipoints sont capables de reproduire une certaine connectivité globale comme le montre la figure 2 : deux images d'entraînement avec différents type de connectivité (lentilles déconnectées ou chenaux continus) permettent de simuler des milieux qui reproduisent ces caractéristiques. Toutefois, il existe également un autre type de connectivité qui n'est pas encore pris en compte : la connectivité conditionnelle. Un essai de traçage indique par exemple que deux points dans l'aquifère sont connecté par un chemin continu de forte perméabilité. Ce type d'information est traditionnellement pris en compte dans un modèle stochastique par des méthodes inverses (MEDINA & CARRERA 1996). Le champ de perméabilité est itérativement perturbé afin que le modèle d'écoulement et de transport reproduise les observations effectués pendant l'essai de traçage. Cette approche est largement acceptée, mais nous pensons que l'algorithme de simulation devrait permettre d'imposer la connectivité directement quand celle-ci est connue. La technique de simulation géostatistique devrait respecter les données locales, le modèle structural (variogramme ou image d'entraînement) et la contrainte de connectivité. Jusqu'à présent, seulement une technique (ALLARD 1994) a été proposée. Elle utilise un échantillonneur de Gibbs et un modèle de gaussiennes seuilées.

5.4 Des raisons techniques

Logiciels. De nombreux logiciels existent pour modéliser les écoulements et le transport de façon déterministe. L'équivalent n'existe pas encre dans le domaine des modèles stochastiques (DAGAN 2004; NEUMAN 2004; WINTER 2004) même si la situation évolue. Par exemple Modflow2000 ou le logiciel commercial Goldsim (<http://www.goldsim.com/>) permettent d'exécuter des simulations de Monte-Carlo facilement. Il existe également des logiciels spécifiquement dédiés à l'analyse de risque dans un contexte stochastique pour des applications particulières comme la conception de décharge (<http://www.landsim.co.uk/>), ou encore des outils permettant de combiner une analyse déterministe et un calcul stochastique comme le code PPath qui permet de quantifier l'incertitude autour d'une zone de capture (<http://www.ifu.ethz.ch/publications/software/pppath>, Stauffer 2005). Tous ces efforts restent toutefois modestes en regard de la quantité de logiciels déterministes existants. Pour rendre les méthodes stochastiques applicables, il est encore nécessaire de développer et de diffuser de nouveaux outils.

Ressources de calcul. L'enquête auprès des professionnels a montré que la méthode de Monte-Carlo est la plus souvent appliquée. Bien que sa mise en œuvre ne soit pas sans difficultés fondamentale (problème de changement d'échelle (RENARD & DE MARSILY 1997), problème de simulations géostatistique sur des grilles non structurés, problème de définition de critères de convergences (BALLIO & GUADAGNINI 2004), etc.), elle pose le plus souvent un problème pratique simple : l'accès à des ressources informatiques suffisantes. Le plus souvent les professionnels n'ont pas accès à des ressources de calculs suffisantes. Cela n'est pas nécessairement vrai. En effet, dans les 5 dernières années le concept de grille de calcul est devenu une réalité (FOSTER et al. 2001). Les informaticiens

on développés des logiciels (middleware) et des procédures permettant à un utilisateur de lancer des calculs de façon transparente sur un grand nombre de machines distantes. De très grandes grilles de calcul dédiés à certains projets (comme le LHC) ont été construites en Europe, aux Etats-Unis, ou encore au Japon, (voir le projet EGEE : Enabling Grid Computing in Europe for E-Science: <http://www.eu-egee.org/>). Ces grilles sont déjà utilisées dans un contexte de recherche et sont extrêmement bien adapté aux simulations de Monte-Carlo car chaque calcul peut être effectué indépendamment sur un nœud de calcul. Une fois que tous les calculs sont lancés, ils n'interagissent plus entre eux. Les résultats ont seulement à être collectés à la fin du processus pour en extraire les statistiques. Un exemple d'application en hydrogéologie est donné dans KERROU ET AL (2006). Cette technologie n'est pas seulement utilisée dans les universités. Des sociétés importantes comme Novartis ont réalisé que l'essentiel des ressources de calculs disponibles au sein de la société sont les ordinateurs personnels des employés. Ils ont ainsi regroupés toutes ces machines au sein d'une grille de calcul qu'ils utilisent pour la recherche de nouveaux médicaments. Des logiciels libres, comme Condor (<http://www.cs.wisc.edu/condor/>), ou commerciaux sont disponibles. On peut ainsi affirmer que cette nouvelle technologie peut désormais être utilisé pour regrouper les PCs disponibles dans une société et de les mettre à disposition des professionnels pour réaliser des simulations de Monte Carlo. Il est clair que ces technologies ne résoudre pas toutes les questions de ressources informatiques. Une autre alternative consiste dans l'achat de temps calcul lorsque cela est nécessaire. Ce nouveau modèle économique, basé aussi sur la technologie grille de calcul, est proposé par certaine société (<http://www.sun.com/service/sungrid/>). A un niveau académique, ou au sein des compagnies de développement de logiciels, un des objectifs est donc certainement de développer des codes de modélisation stochastique qui soient capables d'utiliser ces technologies.

6. Conclusion

L'hydrogéologie stochastique est encore une discipline jeune. L'essentiel de la recherche n'a pas encore atteint le monde professionnel. Ainsi, il existe encore un vaste espace pour des développements théoriques, logiciels, et pour des applications pratiques. Des techniques comme la géostatistique multipoints devraient permettre de réconcilier les approches quantitative de Darcy et descriptive de Paramelle, mais de nombreux efforts doivent encore être réalisés pour faire le lien entre la théorie et la pratique.

D'une part, la communauté académique doit commencer à adapter ses programmes d'enseignement afin de s'assurer que les concepts de base soient assimilés au niveau du Bachelor. Elle doit également offrir l'opportunité aux professionnels d'apprendre à utiliser ces techniques pour résoudre de vrais problèmes pratiques. En fournissant des exemples démonstratifs dans une large gamme d'application et en incluant l'aspect économique, la communauté académique doit participer avec les professionnels dans les actions de lobbying qui doivent être conduite envers les administrations, les législateurs, et les clients. Ensemble, avec les compagnies de développements de logiciels, les chercheurs doivent

promouvoir la distribution d'une large gamme de logiciels conviviaux permettant de réaliser des études stochastiques. Enfin, le monde de la recherche doit fournir au professionnel les données de base requise pour l'emploi des méthodes stochastiques lorsque les données locales sont insuffisantes. Cela est possible si une action concertée et un effort collaboratif pour partager les données dans un système comme *wwhypda* est conduit.

D'autre part, les professionnels doivent se familiariser avec la philosophie des théories stochastiques. Cela n'a rien d'évident. La recherche en hydrogéologie stochastique doit quitter son statut de science obscure aux yeux des praticiens qui doivent pour leur part réaliser quels bénéfices l'utilisation de ces approches peut amener. Ainsi, les professionnels ont un rôle majeur à jouer pour convaincre les administrations et les clients que les méthodes stochastiques peuvent les aider à résoudre leurs problèmes pratiques de façon efficace.

Remerciements

Ce travail a été financé par le Fonds National de la Recherche Scientifique (contrat PP002-106557) et la Commission Européenne (Degree project, contract 034619). Merci à F. Bertone, J.-P. Delhomme, H. Demougeot-Renard, H. Diersch, G.-P. Drolé, J.-M. Côme, O. Jacquet, I. Krusic-Hrustanpasic, M.A. Lavenue, C. Neville, U. Ofterdinger, R. Pecci, V. Rabemanana, S. Rogers, M.-T. Schafmeister, J. Vermaak, and J. Watherhouse pour avoir répondu à l'enquête.

Références

- A.I.S.H. 1956. Symposia Darcy (Dijon, 20-26 septembre 1956). Tome II. - Eaux souterraines, vol. 2, Dijon.
- ALCOLEA A., CARRERA J. & MEDINA A. 2006. Pilot points method incorporating prior information for solving the groundwater flow inverse problem. *Advances in Water Resources*, 29, 11: 1678-1689.
- ALLARD D. 1994. Simulating a geological lithofacies with respect to connectivity information using the truncated Gaussian model. In: M. ARMSTRONG and P. A. DOWD (eds). *Geostatistical simulations: Proceedings of the geostatistical simulation workshop*, Fontainebleau, France, 27-28 May 1993 Kluwer, Norwell, Mass.: 197-211.
- ARMSTRONG M., GALLI A., LE LOC'H G., GEFFROY F. & ESCHARD R. 2001. *Plurigaussian simulations*. Kluwer, Dordrecht,
- BAKR A. A., GELHAR L. W., GUTJAHR A. L. & MACMILLAN J. R. 1978. Stochastic analysis of spatial variability in subsurface flows - 1. Comparisons of one and three-dimensional flows. *Water Resources Research*, 14, 2: 263-271.
- BALLIO F. & GUADAGNINI A. 2004. Convergence assessment of numerical Monte Carlo simulations in groundwater hydrology. *Water Resources Research*, 40, W04603: doi:10.1029/2003WR002876.
- BAYER P., FINKEL M. & TEUTSCH G. 2005. Cost-optimal contaminant plume management with a combination of pump-and-treat and physical barrier systems. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 25, 2: 96-106.

- BIERKENS M. F. P. 2006. Designing a monitoring network for detecting groundwater pollution with stochastic simulation and a cost model. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 20, 5: 335-351.
- CARRERA J. 1993. An overview of uncertainties in modeling groundwater solute transport *Journal of Contaminant Hydrology* 13, 1-4: 23-48.
- CARRERA J., ALCOLEA A., MEDINA A., HIDALGO J. & SLOOTEN L. J. 2005. Inverse problem in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 13, 1: 206-222.
- CHILÈS J.-P. 2001. On the contribution of hydrogeology to advances in geostatistics. In: P. MONESTIEZ, D. ALLARD and R. FROIDEVAUX (eds). *geoENV III - Geostatistics for Environmental Applications* Kluwer Academic Publisher: 1-16.
- CHRISTAKOS G. 2004. A sociological approach to the state of stochastic hydrogeology. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 18, 4: 274-277.
- DAGAN G. 1976. Stochastic conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media - Comment. *Water Resources Research*, 12, 3: 567-567.
- DAGAN G. 1986. Statistical theory of groundwater flow and transport: pore to laboratory, laboratory to formation, and formation to regional scale. *Water Resources Research*, 22, 9: 120S-134S.
- DAGAN G. 1989. *Flow and Transport in Porous Formations*. Springer-Verlag, New-York,
- DAGAN G. 2002. An overview of stochastic modeling of groundwater flow and transport: from theory to applications. *EOS Transactions AGU*, 83, 53: 621.
- DAGAN G. 2004. On application of stochastic modeling of groundwater flow and transport. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 18, 4: 266-267.
- DARCY H. 1856. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Victor Dalmont, Paris,
- DE MARSILY G. 1978. *De l'identification des systèmes hydrogéologiques*. Doctorat d'état thesis, Ecole des Mines de Paris, Pages pp.
- DE MARSILY G., DELAY F., GONÇALVÈS J., RENARD P., TELES V. & VIOLETTE S. 2005. Dealing with spatial heterogeneity. *Hydrogeology Journal*, 13, 1: 161-183.
- DELHOMME J. P. 1979. Spatial variability and uncertainty in groundwater flow parameters. *Water Resources Research*, 15, 2: 281-290.
- DELHOMME J. P. & DE MARSILY G. 2006. Flow in porous media: an attempt to outline Georges Matheron's contributions. In: M. BILODEAU, F. MEYER and M. SCHMITT (eds). *Space, Structure and Randomness: Contributions in Honor of Georges Matheron in the Fields of Geostatistics, Random Sets and Mathematical Morphology*. Lecture Notes in Statistics Springer: 69-88.
- DEMOUGEOT-RENARD H., FOUQUET C. D. & RENARD P. 2004. Forecasting the number of soil samples required to reduce remediation cost uncertainty. *Journal of Environmental Quality*, 33, 5: Q03-Q0354.
- DOUGHERTY J. 2004. *PEST Model independent parameter estimation*. User Manual: 5th edition. pp. 336. *Rapport Technique: Watermark Numerical Computing*.
- FEYEN L. & CAERS J. 2006. Quantifying geological uncertainty for flow and transport modelling in multi-modal heterogeneous formations. *Advances in Water Resources*, 29, 6: 912-929.
- FOSTER I., KESSELMAN C. & TUECKE S. 2001. The anatomy of the grid. Enabling scalable virtual organization. *International Journal of high performance computing applications*, 15, 3: 200-222.

- FREEZE R. A. 1975. A stochastic-conceptual analysis of one dimensional groundwater flow in non uniform homogeneous media. *Water Resources Research*, 11, 5: 725-741.
- FREEZE R. A. 1977. A stochastic-conceptual analysis of one dimensional groundwater flow in non uniform homogeneous media - Reply. *Water Resources Research*, 13, 2.
- FREEZE R. A. 2004. The role of stochastic hydrogeological modeling in real-world engineering applications. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 18, 4: 286-289.
- FREEZE R. A., MASSMAN J., SMITH L., SPERLING T. & JAMES B. 1990. Hydrogeological decision analysis: 1. A framework. *Ground Water*, 28, 5: 738-766.
- GELHAR L. W. 1986. Stochastic subsurface hydrology from theory to applications. *Water Resources Research*, 22, 9: 135S-145S.
- GELHAR L. W. 1993. *Stochastic Subsurface Hydrology*. Prentice-Hall, Engelwood Cliffs,
- GELHAR L. W., BAKR A. A., GUTJAHR A. L. & MACMILLAN J. R. 1977. Stochastic-conceptual analysis of 1-dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media - Comment. *Water Resources Research*, 13, 2: 477-479.
- GÓMEZ-HERNÁNDEZ J. J. & WEN X.-H. 1998. To be or not to be multi-gaussian? A reflection on stochastic hydrogeology. *Advances in Water Resources*, 21, 1: 47-61.
- GUARDIANO F. & SRIVASTAVA R. M. 1993. Multivariate geostatistics: beyond bivariate moments. In *Geostatistics-Troia*, vol. 1 (ed. A. SOARES), pp. 113-114. Kluwer Academic Publications, Dordrecht.
- GUTJAHR A. L. & BRAS R. L. 1993. Spatial variability in subsurface flow and transport - A review. *Reliability Engineering and System Safety*, 42, 2-3: 293-316.
- GUYONNET D., CÔME B., PERROCHET P. & PARRIAUX A. 1999. Comparing two methods for addressing uncertainty in risk assessments. *Journal of Environmental Engineering*, 125, 7: 660-666.
- JOURNEL A. G. & ALABERT F. G. 1990. New method for reservoir mapping. *Journal of Petroleum Technology*, 42, 2: 212-218.
- KERROU J., LECCA G. & RENARD P. T., JAMILA. 2006. Uncertainty in exploitation rates and numerical modeling of its impact on seawater intrusion in the Korba aquifer (TUNISIA). In *First International Joint Salt Water Intrusion Conference*, Cagliari - Chia Laguna, Italy.
- KITANIDIS P. K. 1997. *Introduction to Geostatistics : Applications in Hydrogeology*. Cambridge University Press, 271.
- LAVENUE M. & DE MARSILY G. 2001. Three-dimensional interference test interpretation in a fractured aquifer using the pilot point inverse method. *Water Resources Research*, 37, 11: 2659-2675.
- LE LOC'H G., BEUCHER H., GALI A., DOLIGEZ B. & GROUP H. 1994. Improvement in the truncated gaussian method: Combining several gaussian functions. In *Ecmor 4, 4th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery*, Rosos, Norway.
- LUNATI I. & JENNY P. 2006. Multiscale finite-volume method for compressible multiphase flow in porous media *Journal of Computational Physics*, 216, 2: 616-636.
- MARIETHOZ G., RENARD P., CORNATON F. & JAQUET O. 2006. High resolution stochastic modelling of aquifers, example for a contamination migration problem. In *Proceedings of the Swiss Geoscience Meeting*, Bern, Switzerland, November 24th to 25th.
- MATHERON G. 1962. *Traité de géostatistique appliquée*. Technip, Paris, France,

- MATHERON G. 1965. Les variables régionalisées et leur estimation: une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature. Masson, Paris,
- MATHERON G. 1966. Structure et composition des perméabilités. *Revue de l'IFP*, 21, 4: 564-580.
- MATHERON G. 1967. *Éléments pour une théorie des milieux poreux*. Masson, Paris,
- MATHERON G. & DE MARSILY G. 1980. Is Transport in Porous Media always diffusive ? A counterexample. *Water Resources Research*, 16: 901-917.
- MEDINA A. & CARRERA J. 1996. Coupled estimation of flow and solute transport parameters. *Water Resources Research*, 32, 10: 3063-3076.
- NEUMAN S. P. 1984. Role of geostatistics in subsurface hydrology. In: G. VERLY, M. DAVID, A. G. JOURNAL and A. MARECHAL (eds). *Geostatistics for Natural Resources Characterization. Part 2* D. Reidel Publishing Company: 787-816.
- NEUMAN S. P. 2004. Stochastic groundwater models in practice. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 18, 4: 268-270.
- NEWELL C. J., HOPKINS L. P. & BEDIENT P. B. 1990. A hydrogeologic database for groundwater modeling. *Ground Water*, 28, 5: 703-714.
- PAPPENBERGER F. & BEVEN K. J. 2006. Ignorance is bliss: Or seven reasons not to use uncertainty analysis. *Water Resources Research*, 42, W05302: doi:10.1029/2005WR004820.
- PARAMELLE L. A. 1856. *L'art de découvrir les sources*. Librairie Polytechnique, Paris,
- RAMARAO B. S., LAVENUE M., DE MARSILY G. & MARIETTA M. G. 1995. Pilot point methodology for automated calibration of an ensemble of conditionally simulated transmissivity fields: 1. Theory and computational experiments. *Water Resources Research*, 31, 3: 475-493.
- RENARD P. & COMUNIAN A. 2006. *wwhypda : A world wide hydrogeologic parameters database*. In International symposium Darcy 2006 - Aquifers Systems Management. May 30 - June 1, 2006, Dijon.
- RENARD P. & DE MARSILY G. 1997. Calculating equivalent permeability: A review. *Advances in Water Resources*, 20, 5-6: 253-278.
- RENARD P., LE LOC'H G., LEDOUX E., DE MARSILY G. & MACKAY R. 2000. A fast algorithm for the estimation of the equivalent hydraulic conductivity of heterogeneous porous media. *Water Resources Research*, 36, 12: 3567-3580.
- RUBIN D. B. 2004. Stochastic hydrogeology – challenges and misconceptions. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 18, 4: 280-281.
- RUBIN Y. 2003. *Applied stochastic hydrogeology*. Oxford University Press, New York, 391.
- SAGAR B. 1978. Analysis of dynamic aquifers with stochastic forcing function. *Water Resources Research*, 14, 2: 207-216.
- SRIVASTAVA R. M. 1990. An application of geostatistical methods for risk analysis in reservoir management. In 66th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers held in New Orleans, LA, September 23-26, pp. 825-834.
- STAUFFER F. 2005. Uncertainty estimation of pathlines in ground water models. *Ground Water*, 43, 6: 843-849.

- STREBELLE S. 2002. Conditional simulation of complex geological structures using multiple-point statistics. *Mathematical Geology*, 34, 1: 1-21.
- SUDICKY E. A. 2004. On certain stochastic hydrology issues. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 18, 4: 185.
- 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. *Transactions of the American Geophysical Union*, 2: 519-524.
- THEIS C. V. 1967. Aquifers and models. In: M. A. MARINO (eds). *Proceedings of the symposium on ground-water hydrology* Amer. Water Resources Association: 138.
- WARREN J. E. & PRICE H. S. 1961. Flow in heterogeneous porous media. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1: 153-169.
- WINTER C. L. 2004. Stochastic hydrology: practical alternatives exist. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 14, 8: 271-273.
- ZHANG D. 2002. *Stochastic methods for flow in porous media*. Academic Press, San Diego, CA, 350.
- ZHANG T., SWITZER P. & JOURNEL A. G. 2006. Filter-based classification of training image patterns for spatial simulation. *Mathematical Geology*, 38, 1: 63-80.
- ZHANG Y.-K. & ZHANG D. 2004. Forum: The state of stochastic hydrology. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 18, 4: 265.
- ZINN B. & HARVEY C. F. 2003. When good statistical models of aquifer heterogeneity go bad: A comparison of flow, dispersion, and mass transfer in connected and multivariate Gaussian hydraulic conductivity fields. *Water Resources Research*, 39, 3: 1051, doi:10.1029/2001WR001146.