

Référence bibliographique

Beven, K., Musy, A. & C. Higy (2001). Tribune Libre : L'unicité de lieu, d'action et de temps **Rev. Sci. Eau** 14 (4) : 525-533

Introduction

C'est avec plaisir que nous avons récemment relu les "Tribunes Libres" de Ghislain de MARSILY (1994) et Jacques GANOULIS (1996), plus particulièrement leur discussion relative à une nouvelle typologie des modèles hydrologiques ainsi que leurs réflexions concernant l'analyse des incertitudes. Il nous apparaît toutefois, à la lecture de ces deux articles, qu'il subsiste encore quelques confusions ou interprétations alternatives concernant la modélisation hydrologique. Il est donc important et ceci malgré le fait que nous adhérons à beaucoup de points examinés par ces deux auteurs, de discuter encore quelques éléments de la modélisation hydrologique afin de lever certaines ambiguïtés.

La distinction effectuée par de MARSILY entre les modèles conditionnés par les phénomènes observables et les modèles à base physique utilisés lorsque aucun phénomène n'a été constaté, invite à la critique eu égard aux pratiques réalisées. Par ailleurs, l'argument de GANOULIS affirmant que les modèles à base physique peuvent fournir une description valable des processus si l'on utilise des coefficients empiriques à différentes échelles spatiales et temporelles, ne résiste pas non plus à une analyse détaillée des effets d'échelle. En d'autres termes, la question soulevée par ces auteurs réside dans l'impossibilité d'utiliser une modélisation à base purement physique pour des applications pratiques, en raison de la difficulté de prendre en compte et de transcrire les caractéristiques et le comportement unique de chaque unité du paysage ou chaque sous-bassin versant. Face à cette attitude, nous pouvons affirmer aujourd'hui qu'il existe d'autres voies de réflexion en ce qui concerne l'usage de modèles dits à base physique. Affirmer que tous les lieux concernés par une modélisation distribuée ont des caractéristiques uniques est une évidence géographique. Il n'en reste pas moins que les limitations de la modélisation, exprimées par de MARSILY (1994) dans le contexte des trois principes d'unité de lieu, d'action et de temps, peuvent être mieux définies en procédant à une analyse plus fine dans le contexte de l'unicité. Les unicités expliquent en partie le développement très répandu de la modélisation par rapport à la théorie et des outils propres à des applications particulières. Force est de constater que les attentes face aux prévisions quantitatives en hydrologie ont augmenté parallèlement à l'évolution de la disponibilité et la puissance des ordinateurs. Cette évolution est toutefois due essentiellement aux avancées technologiques plutôt qu'à de réels progrès scientifiques. Pourquoi? En raison principalement des caractéristiques uniques des bassins versants. Celles-ci transcendent, à notre point de vue, toutes les théories disponibles en matière de modélisation hydrologique. De surcroît, cet aspect ne change pas si on émet de meilleures hypothèses physiques ou si on réalise des prévisions pour les variables ou "phénomènes non-observables" discutés par de MARSILY.

Dans cette communication, nous tenterons une évaluation de ces questions et nous suggérerons une approche pertinente de la modélisation hydrologique pour prendre en compte le caractère unique des bassins versants.

L'unicité de lieu, d'action et de temps

Si tous les lieux concernés par une analyse spécifique ont des caractéristiques uniques (l'unicité de lieu), comment peut-on tenter de les généraliser en hydrologie? A notre avis, il y a deux manières principales d'agir à ce niveau : soit par la modélisation des flux - et nous incluons ici les modèles à base physique fondés sur des "lois" hydrologiques qui, dans les applications pratiques, ne sont considérées que comme des généralisations empiriques - par exemple BEVEN (1996a) - soit par la régionalisation empirique des variables hydrologiques d'intérêt. Ces deux approches nécessitent d'avoir à disposition des mesures utiles, en cas de modélisation pour le calage des paramètres, et concernant la régionalisation, pour la constitution d'un échantillon suffisant des valeurs pour l'établissement des corrélations. Dans la discussion qui suit, nous nous concentrerons sur la modélisation et sur le problème de l'unicité comme jeu de paramètres.

A quelques rares exceptions près, les mesures hydrologiques sont effectuées à des échelles ponctuelles ou sur de très petites surfaces en comparaison avec l'échelle naturelle des processus hydrologique et de leur variabilité spatio-temporelle. En conséquence, ces techniques de mesure caractérisent bien le problème de l'unicité de lieu. De plus, en raison de la période limitée d'acquisition des données, on peut raisonnablement conclure qu'elles sont également caractéristiques des unicités de temps et d'action. Seule une mesure de débit ou de concentration d'un traceur dans un flux transcrit une mesure véritablement intégrée de la variabilité des réponses provenant des processus se déroulant en amont du point de mesure, soit à l'échelle du bassin versant, du sous bassin versant, voire du versant uniquement. Cependant, ni les mesures à des échelles ponctuelles, ni les mesures intégrales, ne peuvent donner plus qu'une simple indication de l'hétérogénéité des réponses spatiales et temporelles sans demander un effort important d'investigation in-situ entraînant un coût d'acquisition élevé. On ne peut donc pas, de manière générale, connaître toute la variabilité qui caractérise l'unicité d'un bassin versant, d'où l'élément de surprise associé avec les mesures de traceur à petite et grande échelle (e.g FLURY et al., 1994, IORGULESCU, 1997, JOERIN, 2000).

Il est vrai que l'on peut effectuer une classification des versants par le biais de différents indices basés sur la topographie, la végétation, le sol ou encore le substratum géologique. Beaucoup de modélisateurs disposent actuellement de systèmes d'information géographique (SIG) utilisés à cet effet. De telles bases de données ont déjà servi à la modélisation des bassins versants (e.g. SCHULTZ, 1996; FLÜGEL, 1995 ; HIGY et MUSY, 2000) mais celles-ci ne donnent qu'une indication générale des variables hydrologiques importantes. Elles ne précisent pas directement les valeurs des paramètres nécessaires à la modélisation. Par exemple, il a été démontré que le plan des écoulements de la zone saturée peut être plus influencé par la topographie du substratum que par celle de la surface (McDONNELL et al., 1996; FREER et al., 1997); que les caractéristiques hydrauliques du sol obtenues à partir de mesures physique (fonction de pédo-transfert) ne donnent pas toujours de bonnes prévisions hydrologiques (HIGY 2000) et que, en ce qui concerne la végétation, il est possible de mesurer des réponses très diverses pour le même type de végétal. Il s'ensuit que les données obtenues à partir des SIG peuvent être effectivement utilisées pour la modélisation hydrologique, mais il en résulte alors des incertitudes considérables. Jusqu'ici, la question du caractère unique des versants ou des bassins versants n'a pas pu être résolue par le seul apport de jeux de données, aussi pertinentes et complètes que puisse être ces dernières.

Dans ce contexte, on peut encore évoquer un argument réductionniste qui considère que, si l'on pouvait développer un meilleur modèle descriptif des processus naturels incluant tous les effets de l'hétérogénéité, on aurait par conséquent une meilleure représentation de ceux-ci en des endroits particuliers. Cette vision adoptée par de MARSILY (1994), lui a permis de conclure sa réflexion relative à l'unique manière d'établir la prévision de phénomènes "non-observables" en soulignant une triple tendance : géométrisation du réel, déglobalisation des processus et analyse de scénarios et en insistant sur un report du travail de la modélisation en amont, à savoir à un niveau de compréhension des processus sous-jacents aux phénomènes que l'on modélise. De MARSILY a ainsi utilisé les exemples de la

modélisation de la déposition fluviale pour caractériser la structure d'aquifères de types particuliers ainsi que le stockage des déchets radioactifs pour étayer son propos. GANOULIS exploite aussi l'argument selon lequel la modélisation à base physique ne peut réussir que si l'on dispose d'une théorie pour l'agrégation des paramètres à une échelle appropriée. Nous pourrions accepter une telle ligne de recherche pour l'amélioration de la compréhension des processus d'écoulement sous la forme d'hypothèses, mais il convient de rappeler alors qu'il ne s'agit, dans ce cas, plus qu'une compréhension strictement hypothétique et non réelle, bien qu'elle soit fondée sur des observations. Pour une application pratique "in situ", nous croyons que cet argument est impossible à justifier (pour une explication plus complète voir BEVEN, 1995, 2000). En effet, combien de modélisations réalistes d'un domaine sont-elles possibles? Combien de valeurs de paramètres conduisent-elles réellement à des résultats différents? Combien de mesures physiques sont-elles nécessaires pour effectuer une agrégation appropriée ou, du moins, pour réduire le nombre de simulations. Les expériences effectuées à Yucca Mountain (USA) ou à Sellafield (UK) pour le stockage de déchets radioactifs ont permis de souligner les difficultés d'avoir une cohérence entre des modélisations - ou des modélisateurs ! - différents basées sur cette approche. Dans de tels cas, on peut au mieux obtenir des scénarios plus ou moins réalistes, mais comportant toutefois beaucoup d'incertitudes.

Les unicités de lieu, d'action et de temps engendrent par leur essence même des incertitudes sur la prévision, la modélisation des flux ou la régionalisation directe des variables nécessaires à une application spécifique. Nous pouvons constater que le problème de l'unicité restera une limitation pour les applications pratique malgré le fait que nous aurions développer une théorie des processus "parfaite".

L'unicité comme jeu de paramètres

La modélisation des flux pour un bassin versant peut être extrapolée vers un autre bassin versant dans une optique de modélisation bien particulière. Dans cette situation, le caractère unique du bassin versant se réduit à l'unicité du jeu de paramètre caractérisant le bassin ainsi qu'aux conditions initiales et aux limites nécessaire à la modélisation. Comme de MARSILY (1994) l'a signalé dans le cas où des données sont disponibles, le calage des paramètres incite à considérer le modèle comme une "boîte noire", même si celui-ci est un modèle à base physique. GANOULIS (1996) s'oppose quant à lui à l'idée que les modèles à base physique puissent aussi présenter un comportement de type "boîte noire" mais cette position n'est toutefois pas toujours défendable lors d'applications pratiques (voir BEVEN, 1989, 1996a).

Le problème principal de la caractérisation de l'unicité des bassins versants par des valeurs de paramètres est que, lors de la calibration des modèles, la plupart de ces derniers ont suffisamment de degrés de liberté pour produire des simulations acceptables en comparaison avec les données disponibles. Normalement, il n'est pas difficile de trouver un jeu de paramètres convenables (si la définition de cette acceptabilité n'est pas trop limitée). Ce problème est aussi une résultat des erreurs de mesure et incertitudes d'interpolation spatiale et temporelle sur les données elles-mêmes.

Donc, implicitement, il faut admettre que l'on ne peut pas représenter le comportement hydrologique d'un bassin versant unique par un jeu de paramètres uniques. Il est préférable, dans de tels cas, de considérer "l'équifinalité" des jeux de paramètres multiples qui produisent les simulations admissibles de la réponse d'un bassin versant (BEVEN, 1993, 1996a). Le fondement de cette approche réside dans le constat qu'il n'y a en règle générale pas un seul et unique jeu de paramètres optimal pour caler un modèle mais une famille de solution ou des régions d'une surface de réponse donnant des résultats de qualité similaire. Pour éviter ce problème, il existe des méthodes développées pour les portions des surfaces de réponse du modèle en utilisant des méthodes de calage multi-objectifs (GUPTA et al., 1998 ; YAPO et al., 1998; TARANTOLA, 1987) mais si, par conséquent, on peut rejeter plus de jeux de paramètres, il reste encore un ensemble de modèles acceptables.

L'interprétation des valeurs calées des paramètres devient alors difficile et la "validation" de la modélisation impossible, car les valeurs des paramètres dépendent essentiellement de la construction et du mode d'application du modèle, des conditions initiales et limites, de la période d'acquisition des données disponibles, et surtout des valeurs des autres paramètres. Il s'ensuit que l'extrapolation des grandeurs des paramètres à d'autres conditions sera très incertaine, comme l'ont démontré PARKIN et al. (1996).

Il existe encore une autre implication intéressante de cette problématique. Souvent, il n'est pas possible de mesurer toutes les grandeurs des paramètres nécessaires à l'application d'un modèle et il devient nécessaire de rechercher dans la littérature des valeurs numériques pour les conditions du sol, du sous-sol, ou de des types végétation "similaires", par exemple. Mais, pour obtenir des valeurs "effectives", ces grandeurs ont souvent été calées, et de surcroît pour des conditions différentes (uniques) de lieu et de temps et peut-être pour des modèles autres que celui que l'on utilise (bien que ces derniers soient tous à base physique) ! Ce type d'approche est souvent effectuée lors de la modélisation des transferts sol-végétation-atmosphère. Le fait que le calage résulte souvent d'une optimisation aggrave encore le problème. En effet, on effectue dans ce cas un choix d'un jeu de paramètres parmi plusieurs qui sont compatibles avec les données disponibles mais ceci pour une évaluation de performance de modèles différents ! De plus, l'incertitude résultant de l'optimisation spécifique des valeurs de paramètres publiées s'additionne aux autres sources d'incertitudes. Cette approche est toutefois possible, sous réserve de conditions relatives aux interactions complexes entre les valeurs des paramètres, à la structure de la modélisation ainsi qu'en fonction des conditions initiales et limites et selon la période d'acquisition des données utilisées pour le calage (BEVEN, 1993, 1995, 2000).

Les prédictions à l'issue d'une modélisation combinant différentes valeurs de paramètres provenant de sources diverses sont par conséquent extrêmement délicates celles-ci pourraient s'avérer être aussi bonnes que mauvaises.

L'unicité et l'incertitude: au-delà d'une approche réductionniste

Cette brève discussion a mis en évidence les limitations d'une approche réductionniste concernant l'unicité du comportement hydrologique des bassins versants. En particulier, il convient de différencier une modélisation déductive en vue d'une compréhension des processus hydrologiques dans un domaine bien défini, d'une modélisation pour la prévision effective de la réponse hydrologique unique à l'échelle d'un aquifère ou d'un bassin versant. Un constat similaire peut être fait même pour les phénomènes "non-observables". Dans ce dernier cas, il apparaît comme impossible de construire une théorie ou une modélisation qui dépende seulement des mesures physiques au vu des moyens techniques dont on dispose actuellement. Il s'ensuit que le calage est inévitable et que les prévisions doivent être invariablement associées aux incertitudes qui les entachent.

Ainsi, si une description réductionniste est impossible et les représentations à l'échelle d'un bassin incertaines, comment aborder la modélisation à l'avenir ? Une voie possible est d'effectuer les prévisions selon une structure de conditionnement et de rejet de modélisations invalidées. Quelques schémas de telles structures sont possibles et nous renvoyons le lecteur aux exemples de conditionnement donnés par DE MARSILY (1994) ainsi qu'aux exemples de logique floue suggérés par GANOULIS (1996). Nous restons toutefois convaincu qu'un tel conditionnement est possible à partir du moment où l'on prend en considération l'équifinalité des modélisations.

Considérons pour le moment que une (ou plusieurs) modélisation(s) a (ont) été choisie(s) pour une application pratique (même s'il s'agit de la prévision de phénomènes non-observables). A priori, tous les modèles qui prévoient les variables expliquées sont des modélisations potentielles (on peut toutefois procéder initialement à un choix en tenant compte de préférences plus ou moins scientifiques). Dans

toutes les modélisations, il faut ainsi spécifier les valeurs de quelques paramètres. Celles-ci seront incertaines mais, avec l'estimation des gammes des valeurs - et, rarement, avec celle de la co-variabilité - il est possible de procéder à des simulations avec plusieurs jeux de paramètres pour évaluer l'incertitude des prévisions.

Il est clair que l'on pourrait certainement s'arrêter là (comme PARKIN et al., 1996), c'est à dire en exploitant la distribution des prévisions (avec toutes les variations spatio-temporelles des modélisations distribuées et non-linéaires) directement dans une analyse de risque. Cependant, il est aussi pertinent de procéder à une évaluation des simulations en comparaison avec les données disponibles, que ce soit des variables observables où des opinions d'experts. On peut ainsi espérer qu'un tel conditionnement réduira la gamme des prévisions, et permettra le rejet des modélisations peu ou pas crédibles. Celui-ci pourrait ainsi permettre une représentation plus précise de l'unicité du comportement d'un bassin versant particulier. Néanmoins il existera toujours plusieurs modélisations assez compatibles avec les données (où le terme "assez" dans ce contexte est lié à une notion qualitative). Un tel conditionnement a été formalisé dans la méthodologie GLUE de BEVEN et BINLEY (1992), qui utilise les réalisations Monte Carlo pour faire une exploration de la gamme des simulations possible.

Par conséquent la disponibilité des données revêt une extrême importance. C'est pourquoi DE MARSILY (1994) a différencié la prévision des phénomènes non-observables des phénomènes observables. Une question qui peut alors être posée est de savoir comment peut-on disposer des données pour les conditions futures, par exemple ? Ceci n'est évidemment pas possible, mais, comme GANOULIS l'a montré, il y a toujours au moins quelques opinions pour un processus de conditionnement. On peut donc à cet effet utiliser des techniques bayésiennes ou floues. On commence ainsi à s'intéresser à l'efficacité des différents types de données dans le processus de conditionnement et particulièrement dans le rejet des modélisations. On notera encore que l'on propose dans ce contexte une évaluation des données tout à fait différente de la mesure directe des valeurs de paramètres. De plus, on peut encore évaluer une telle efficacité en regard des coûts d'acquisition des données.

Une telle approche permettrait une formulation différente en vue d'une hydrologie scientifique à plus grande échelle, soit du versant au bassin versant. Malgré que la présentation de ces idées soit faite ici dans le cas d'applications pratiques, elle ne serait pas limitée aux approches de l'ingénieur praticien. Au fond, il est nécessaire de disposer d'une théorie pour décrire et comprendre la réponse hydrologique à l'échelle des prévisions exigées, qui satisfasse aussi les attentes face aux réponses antérieures des bassin versants. Une telle théorie pourrait être sous la forme d'une modélisation conceptuelle, soit empirique, soit à base physique, soit inductive. De plus, une telle approche pourrait être fondée sur une tentative d'agrégation des paramètres à petite échelle en des valeurs effectives à grande échelle, ou pourrait aussi prendre en considération un résumé des opinions des experts. Toutes ces théories, avec tous les ensembles de paramètres nécessaires, sont candidates pour le concours d'évaluation, de conditionnement ou de rejet. Il est possible que toutes les possibilités ne soient pas évaluées mais ceci dépend d'un choix donc d'un rejet a priori de certaines théories et modèles qui peut être discuté. C'est à ce moment que l'on pourra évaluer quelles sont les approches les plus efficaces, et les données les plus appropriées pour les différentes applications.

A ce stade de réflexion, on peut raisonnablement se demander si nous avons décrit une science hydrologique conforme à une épistémologie relativiste proposé par FEYERABEND (1975) en opposition avec les structures beaucoup plus méthodiques comme certains critères de démarcations tel que la falsifiabilité de POPPER (1998). La réponse est affirmative et sans excuse. Le message essentiel de cette contribution est que l'incertitude, l'équifinalité et le relativisme sont consécutifs à l'unicité de lieu, d'action et de temps et ceci jusqu'à ce que l'on ait suffisamment de données qui permettent le rejet de certaines possibilités. Un tel rejet est possible dans certains cas tandis que pour le reste on ne peut qu'évaluer les indices de vraisemblance ou de possibilité d'association. Toutefois, préalablement à toute

étape de rejet, il convient de préciser clairement les règles d'une telle compétition entre modèles et schémas de modélisation. Ainsi, d'autres chercheurs auraient la possibilité de répéter ce " jeu ", d'évaluer les données, d'améliorer les règles, de faire des expériences particulières pour tester des hypothèses et, nous l'espérons, éventuellement de réduire l'incertitude des prévisions. Si l'approche proposée est relativiste, il ne s'agit toutefois que d'un relativisme scientifique.

La modélisation comme projection de l'espace "paysage" dans l'espace modélisation

Il est possible d'adopter un tout autre point de vue concernant l'incertitude perçue comme le produit de l'unicité de lieu, d'action et de temps. Si l'on dispose de plusieurs représentations du paysage (bassin versant, sous-bassin, versant, unité de réponse hydrologique, ou parcelle) qui sont compatibles avec les données disponibles, on possède en somme une sorte de transformation - ou projection - incertaine ou floue du paysage dans l'espace de modélisation dont les axes sont définis par les paramètres libres (et peut-être aussi par les types de structure de la modélisation retenue). Chaque parcelle du paysage peut être représentée par plusieurs jeux de paramètres (ou structures de la modélisation) qui sont compatibles avec les données disponibles. De la même manière que les incertitudes des prévisions sont évaluées par le biais d'une méthodologie de type GLUE, on peut attribuer une mesure de vraisemblance à chaque jeu de paramètres. Ces mesures fonctionnent de façon similaire à une transformation empirique entre paysage et espace de modélisation, transformation complexe car l'espace des jeux de paramètres représentatifs d'un élément du paysage n'est pas nécessairement trivial ou borné à une région particulière de l'espace de modélisation (FRANKS et BEVEN, 1997; BEVEN et FRANKS, 1999).

De ce point de vue, il existe des possibilités intéressantes de développement : le but principal de la modélisation hydrologique étant d'évaluer le fonctionnement hydrologique et les flux d'eau dans le paysage. Toutefois, si notre degré de confiance en un modèle est élevé - car fondé par exemple sur l'expérience -, le fonctionnement hydrologique dans l'espace de modélisation peut être en principe parfaitement connu avec pour seul facteur limitant les capacités de calculs des ordinateurs. Ceci est en principe aussi vrai pour la modélisation stochastique, dès lors que l'on admet que le terme " parfaitement " traduit simplement la stabilité des statistiques exploitées. L'incertitude n'est pas dans la modélisation elle-même mais bien dans la transformation floue du paysage dans l'espace de la modélisation. En prenant conscience de cette inversion du processus de modélisation, on peut rechercher des techniques ou des données afin de contraindre les possibilités de transformation dans un esprit scientifique. On peut envisager, par exemple, un examen du fonctionnement dans l'espace de modélisation en vue de la détermination d'hypothèses pouvant être mises ensuite à l'épreuve sur le terrain afin de procéder à une réduction des jeux de paramètres ou des modélisations possibles. Un tel schéma nous conduit ainsi à fusionner notre vue relativiste avec une approche basée sur un critère de falsifiabilité.

La reconnaissance de l'équifinalité dans la modélisation hydrologique demandera encore de nouveaux concepts. Dans cette Tribune Libre, nous avons exposé les lignes d'une telle possibilité de réflexion relative à la modélisation et au conditionnement des paramètres dans des limites imposées par les données disponibles. Nous espérons au moins que cette Tribune Libre donnera au lecteur l'occasion de réfléchir quant à la nature même de l'activité scientifique et quant au rôle des modèles en tant que schémas prédictifs et explicatifs de phénomènes physiques.

Remerciements

Keith Beven remercie Ion Iorgulescu qui a attiré son attention à la Tribune Libre de Ghislain de Marsily, l'Institut d'aménagement des terres et des eaux de l'EPFL pour le soutien apporté durant son séjour à Lausanne, Bruno Ambroise pour une critique perspicace, et son professeur de français, Angela Bolton, pour son encouragement, son amitié, et sa persévérance avec un élève récalcitrant. André Musy et

Christophe Higy remercie Keith Beven de ses avis et remarques pertinents qu'il a prodigués à chacune de ses visites à Lausanne.

Références bibliographiques

- BEVEN, K.J. (1989). Changing ideas in hydrology: the case of physically based models. *J. Hydrol.*, 105, 157-172.
- BEVEN, K.J. (1993). Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. *Adv. Water Resour.*, 16, 41-51.
- BEVEN, K.J. (1995). Linking parameters across scales: sub-grid parameterisations and scale dependent hydrological models. *Hydrol. Proc.*, 9, 507-526 (aussi dans J. Kalma and M. Sivapalan (Eds.) *Scale Issues in Hydrological Modelling*, Wiley, Chichester, UK.)
- BEVEN, K.J., (1996a). A discussion of distributed modelling. Chapter 13A, Dans: J.-C. Refsgaard and M.B. Abbott (Eds.) *Distributed Hydrological Modelling*, Kluwer, Dordrecht, NL, pp.255-278.
- BEVEN, K.J., (1996b). Equifinality and Uncertainty in Geomorphological Modelling. Dans: B.L. Rhoads and C.E. Thorn (Eds.), *The Scientific Nature of Geomorphology*, Wiley, Chichester, UK, pp. 289-313.
- BEVEN, K.J. (2000). Uniqueness of place and the presentation of hydrological processes. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 4, 203-213.
- BEVEN, K. J. (2001). How far can we go in distributed hydrological modelling, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 5, 1-12.
- BEVEN, K.J., BINLEY, A.M. (1992). The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrol. Proc.*, 6, 279-298.
- BEVEN, K.J., FRANKS, S.W. (1999). Functional similarity in landscape scale SVAT modelling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 3, 85-94.
- DE MARSILY, G. (1994). [Quelques réflexions sur l'utilisation des modèles en hydrologie](#). *Rev. Sci. Eau*, 7, 219-234.
- FEYERABEND, P. (1975). *Against method: Outline of an anarchist theory of knowledge*. New Left Books, London, UK.
- FLÜGEL, W. (1995). Delineating hydrological response units by Geographical Information System analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl, Germany. *Hydrol. Process.*, 9, 423-436
- FLURY, M., FLUHLER, H., JURY, W. A. and LEUENBERGER, J. (1994). Susceptibility of soils to preferential flow of water: a field study. *Water Resour. Res.*, 30, 1945-1954.
- FRANKS, S., BEVEN, K J. (1997). Estimation of evapotranspiration at the landscape scale: a fuzzy disaggregation approach. *Water Resour. Res.*, 33, 2929-2938.
- FREER, J., BEVEN, K.J., AMBROISE, B. (1996). Bayesian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: an application of the GLUE approach. *Water Resour. Res.*, 32, 2161-2173.

- GANOULIS, J. (1996). [Sur la modélisation des phénomènes hydrologiques](#). *Rev. Sci. Eau*, 9, 421-434.
- GUPTA, H.V., SOROOSHIAN, S., YAPO, P.O. (1998) Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information. *Water Resour. Res.*, 34: 751-763.
- HIGY, C. (2000). *Modélisations conceptuelle et à base physique des processus hydrologiques: Application au bassin versant de la Haute-Mentue*. Thèse EPFL, No 2148, Lausanne, 311 p.
- HIGY, C., MUSY, A. (2000). Digital terrain analysis of the Haute-Mentue catchment and scale effect for hydrological modelling with TOPMODEL. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 4: 225-237.
- IORGULESCU, I. (1997). *Analyse du comportement hydrologique par une approche intégrée à l'échelle du bassin versant. Application au bassin versant de la Haute-Mentue*. Thèse EPFL, No 1613, Lausanne, 216 p.
- JOERIN, C. (2000). *Étude des processus hydrologiques par l'application du traçage environnemental. Association à des mesures effectuées à l'échelle locale et analyse d'incertitude*. Thèse EPFL, No 2165, Lausanne, 234 p.
- McDONNELL, J.J., FREER, J., HOOPER, R., KENDALL, C., BURNS, D., BEVEN, K.J., PETERS, J. (1996). New method developed for studying flow on hillslopes. *EOS, Trans. AGU*, 77 (47), 465/472.
- PARKIN, G. , O'DONNELL, G., EWEN, J., BATHURST, J., O'CONNELL, P.E., LAVABRE, J. (1996). Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts. 1. Case study for a Mediterranean catchment. *J. Hydrol.*, 175, 595-613
- POPPER, K. (1998) *La connaissance objective*. Flammarion, Champs, France, 576 p.
- SCHULTZ, G. (1996). Remote sensing applications to hydrology: runoff. *Hydrol. Sci. J.*, 41, 453-475.
- TARANTOLA, A. (1987) *Inverse problem theory: Methods for data fitting and model parameter estimation*. Elsevier, Amsterdam/New York, 613 p.
- YAPO, P.O., GUPTA, H.V., SOROOSHIAN, S. (1998). Multi-objective global optimisation for hydrologic models. *J. Hydrol.*, 203: 83-97.

Correspondance

[Keith J. Beven](#), Environment Lancaster, [Institute of Environmental and Natural Sciences](#), Lancaster University, Lancaster LA1 4YQ, GRANDE-BRETAGNE
Courriel: k.beven@lancaster.ac.uk

André Musy, Soil and Water Management Institute, [École Polytechnique Fédérale de Lausanne](#) (Swiss Federal Institute of Technology), CH-1015 Lausanne, SUISSE
Courriel: andre.musy@epfl.ch

Christophe Higy, Soil and Water Management Institute, [École Polytechnique Fédérale de Lausanne](#) (Swiss Federal Institute of Technology), CH-1015 Lausanne, SUISSE