

## QUELQUES PROBLEMES (ET SOLUTIONS) EN MODELISATION HYDROLOGIQUE

### SOME ISSUES (AND SOLUTIONS) IN HYDROLOGICAL MODELLING

**Bruno AMBROISE**, *LHyGeS (UMR 7517 Uds-CNRS), Strasbourg, France.*  
*ambroise@unistra.fr*

**RESUME:** Les recherches sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants ont conduit à plusieurs grands types de modèles (statistiques globaux, conceptuels globaux ou semi-spatialisés, à bases physiques spatialisés) ayant chacun leurs avantages et limitations. Parmi les points-clés encore à résoudre, certains concernent la conceptualisation de la réalité (pertinence de la structure du modèle et des outils mathématiques, prise en compte de l'organisation fonctionnelle) et d'autres résultent du calage des modèles (transposabilité et non-unicité, procédures de calage et validation, estimation de l'incertitude). Les progrès en modélisation passent par une meilleure interaction entre réalité et modèle, hydrologie et disciplines connexes, recherche et application – autour d'outils comme les bassins versants de recherche.

**Mots-clés :** conceptualisation, calage, validation, non-unicité, transposabilité, incertitude, bassin versant de recherche

**ABSTRACT:** Research on the hydrological behaviour of catchments has led to several main types of models (global statistical, global or semi-distributed conceptual, distributed physically-based), each having its own advantages and limitations. Among the outstanding key issues, some concern the conceptualization of reality (relevance of the model structure and mathematical tools used, explicit integration of the catchment functional organization), others result from the model calibration (impact on model transposability and equifinality, calibration and validation procedures, estimation of results uncertainty). Progress in modelling depends on better interactions between reality and model, hydrology and related disciplines, research and application – using tools such as research catchments.

**Keywords:** conceptualization, calibration, validation, equifinality, transposability, uncertainty, research catchment

## INTRODUCTION

Depuis 50 ans, le développement de l'hydrologie – science étudiant la partie continentale du cycle de l'eau et des cycles couplés (solutés, sédiments, énergie) – a connu plusieurs grandes étapes, environ une par décennie, qui se retrouvent dans les progrès de la modélisation hydrologique:

- Jusque dans les années 1960, le moteur de l'hydrologie a été l'ingénierie hydrologique, s'intéressant à la gestion et à la maîtrise des ressources en eau, avec une approche essentiellement quantitative et empirique, sur la période actuelle et à une échelle surtout régionale.
- Dans les années 1970, l'hydrologie a bénéficié de l'apport de l'hydrodynamique (notamment des milieux poreux) permettant non plus seulement de décrire mais aussi d'expliquer les processus identifiés, avec une approche toujours quantitative mais désormais dynamique, toujours sur la période actuelle mais à une échelle plutôt locale.
- Dans les années 1980, l'émergence de grands problèmes (paléo-) environnementaux a conduit l'hydrologie, en collaboration étroite avec les sciences de la terre et de l'atmosphère, à adopter une approche aussi qualitative (les flux couplés), s'intéressant aux chemins de l'eau et aux temps de résidence, avec des recherches remontant à la période historique (voire paléo-historique) et s'étendant à l'échelle continentale (voire globale).
- Dans les années 1990, la dynamique du cycle de l'eau et des cycles couplés, jusqu'alors abordée plutôt par grands compartiments (surface, sol, sous-sol, ...), a été étudiée aussi à l'échelle globale des hydrosystèmes concernés.
- Enfin, les années 2000 ont été marquées par l'émergence en hydrologie de la question de l'incertitude, indispensable à estimer pour bien répondre aux problématiques actuelles comme l'impact des changements (climatiques, anthropiques, ...) et la question des bassins non jaugés.

Ceci a conduit à la mise au point et à l'utilisation de quelques grands types de modèles pour représenter les fonctionnements hydrologiques à l'échelle du bassin versant, ayant chacun leurs avantages et leurs limitations et donc leurs domaines de validité et d'application spécifiques:

- Les modèles statistiques globaux, où le bassin versant est considéré globalement comme une simple "boîte noire" (entrées-sorties), avec une

approche purement empirique à base de traitements de séries chronologiques (fonctions de transfert, ...); ils permettent une simulation très simple (avec très peu de paramètres) d'une seule variable d'intérêt (généralement, les débits), mais avec une approche trop globale et descriptive rendant ces modèles non transposables.

- Les modèles conceptuels globaux ou semi-spatialisés, s'appuyant sur une certaine conception du fonctionnement du bassin versant considéré alors comme un assemblage de réservoirs interconnectés, avec cette fois une approche plutôt systémique (stocks, échanges, ...); ils permettent une simulation restant simple de plusieurs variables et, pour ceux s'appuyant sur un maillage de l'espace, une certaine prise en compte de l'organisation spatiale du bassin; mais leurs paramètres empiriques restent non mesurables, ce qui rend non transposables ces modèles aussi.
- Les modèles à bases physiques spatialisés, où le bassin est considéré comme un ensemble de points en interaction (du double point de vue de l'eau et de l'énergie), étudié d'une façon dynamique (flux, forces, résistances), avec des paramètres physiques qui sont mesurables – en principe, au moins; ils permettent non seulement une simulation mais aussi une explication des variations spatio-temporelles de N variables d'état; ils sont donc en principe transposables mais sont en pratique souvent trop complexes pour pouvoir être appliqués à l'échelle d'un bassin.

Les recherches actuelles en modélisation hydrologique cherchent à développer de nouveaux modèles conservant les avantages de ces grands types tout en réduisant leurs limitations. Pour progresser en ce sens, plusieurs points-clés restent à résoudre, avec dans la littérature internationale certaines pistes proposées pour y arriver (Ambroise, 1999a, 1999b; Beven, 2012).

## **CONCEPTUALISATION DE LA REALITE**

Par les choix faits à chaque étape, les modèles reflètent les conceptions de leurs développeurs sur les fonctionnements hydrologiques. D'où la nécessité pour tout utilisateur d'un modèle de bien vérifier avant toute application la pertinence de ces choix de conceptualisation par rapport à ses propres conceptions sur la réalité à traiter – ce qui n'est pas toujours

facile, faute souvent de disposer d'un descriptif du modèle suffisamment détaillé.

### **Adéquation de la structure du modèle ?**

Longtemps, à la suite des travaux de Horton (1933) aux USA, le paradigme dominant en hydrologie pour expliquer et simuler les crues a été celui d'une genèse par un processus de ruissellement "par dépassement de l'infiltrabilité du sol". Cette conception imprègne tant l'hydrologie que le mot "ruissellement" est encore trop souvent utilisé pour dénommer non seulement les "écoulements à la surface d'un versant" mais aussi les "écoulement fluviaux" dans les cours d'eau. Elle se retrouve, explicitement ou implicitement, dans nombre de méthodes de l'ingénierie hydrologique, qui privilégie une approche "transmissive" (les flux) des fonctionnements hydrologiques.

Plus récemment, à la suite des travaux de Cappus (1960) en France qui ont permis d'identifier un autre type de ruissellement, "par dépassement de la saturation du sol", ce processus a été repris comme paradigme par de nombreux modélisateurs de l'hydrosystème sol-végétation-atmosphère en météorologie et climatologie, privilégiant une approche plutôt "capacitive" (les stocks).

En fait, les études de terrain menées dans de très nombreux milieux ont montré que les crues pouvaient être, selon les cas, générées par tout un ensemble de processus tant de surface que souterrains (Ambroise, 1998), et que ces 2 paradigmes constituaient des cas extrêmes, certes largement représentés dans le monde mais loin de correspondre à toutes les situations. Utilisés sans vérification préalable de leur pertinence pour chaque cas traité, ces 2 types de modèles peuvent conduire, après calage, à des valeurs de paramètres tout à fait irréalistes.

### **Adéquation des outils mathématiques ?**

Les études de terrain ont bien montré le caractère souvent fortement non linéaire (la réponse n'étant pas proportionnelle au forçage) des fonctionnements hydrologiques à différentes échelles, du fait de rétroactions internes et/ou d'effets de seuils faisant dépendre la réponse des conditions initiales aussi. Et pourtant, l'attirail mathématique disponible en hydrologie est constitué de nombreux outils et méthodes de type linéaire (hydrogramme unitaire, ...), largement utilisés notamment en ingénierie hydrologique pour leur simplicité d'emploi. Leur utilisation sans précaution, notamment en extrapolation (prévision des événements exceptionnels), peut donc conduire

à des résultats irréalistes, voire dangereux s'ils doivent servir de base à des décisions.

A titre d'exemple, cet effet majeur des conditions initiales dans les fonctionnements hydrologiques – pourtant bien connu des hydrologues depuis longtemps – n'a été pris en compte dans la procédure française d'alerte des crues qu'à partir de 2005, suite aux dommages catastrophiques non prévus d'un épisode de pluies intenses survenant 48 h seulement après un épisode de pluies très intenses n'ayant causé, lui, que peu de dommages car bien anticipé (Boudevillain et Delrieu, 2005).

### **Adéquation de l'organisation fonctionnelle ?**

Les études de terrain ont permis d'identifier les facteurs du milieu contrôlant les différents processus hydrologiques, et également de souligner l'importance des concepts complémentaires mais distincts de "zone active variable" et de "zone contributive variable" (Ambroise, 2004): une zone active (où est actif un processus générant un flux) ne contribue au débit à l'exutoire du bassin que si elle est hydrauliquement connectée à cet exutoire. Cette distinction est utile aussi pour l'aménagement, puisque le contrôle de ces flux (eau, sédiments, solutés, ...) à l'exutoire peut se faire en jouant soit sur les zones actives (de production), soit sur les connexions.

Il est relativement facile, à l'aide par exemple de systèmes d'informations géographiques (SIG), de cartographier ces facteurs pour aboutir à des cartes d'unités hydrologiques homogènes" et de "zones actives" dans un bassin versant, et de prendre en compte ces aspects typologiques dans des modèles (semi-)spatialisés. Il n'en est pas encore de même des aspects topologiques comme les connectivités: ces connexions – elles-mêmes souvent variables au cours du temps – sont beaucoup plus difficiles à identifier sur le terrain et à prendre en compte explicitement dans les modèles.

L'importance de prendre en compte dans les modèles de bassin versant non seulement la typologie mais aussi la topologie de ces unités hydrologiques peut être illustrée par la "brousse tigrée" au Sahel (Thiéry et al., 1995) ; cet hydrosystème naturel est constitué d'une alternance en courbes de niveau de bandes de sol nu de latérite imperméable et de bandes de forêt dense à sol perméable: du fait de cette configuration particulière empêchant les connexions hydrauliques, aucun débit ne sort à l'exutoire de cet hydrosystème pourtant en grande partie imperméable et donc ruisselant.

## CALAGE DU MODELE

Contrairement à d'autres disciplines, l'hydrologie bénéficie souvent de la possibilité de caler ses modèles sur des séries disponibles de débits mesurés. Cette facilité, sans laquelle nombre de modèles ne seraient pas utilisables, est certes un avantage réel en pratique, mais elle est aussi la source de nombreux effets pervers, découlant du double rôle joué par le calage:

- l'un, explicite et revendiqué, d'estimation *a posteriori* de paramètres non connus *a priori* ;
- l'autre, implicite et trop souvent oublié ou négligé, de compensation sur ces seuls paramètres de toutes les incertitudes et erreurs liées au modèle ou aux données utilisés.

### Transposabilité et non-unicité

Établi sur un bassin donné dans un état donné et pour une gamme d'événements donnée, tout calage réduit inévitablement la transposabilité à d'autres conditions du modèle ainsi calé. Une très grande prudence s'impose donc si on l'utilise :

- en transposition environnementale, sur le même bassin : extrapolation à des événements extrêmes, application à un autre état du bassin en cas de changement interne (urbanisation, dé/reforestation, aménagement majeur, ...);
- en transposition géographique : application à un autre bassin même similaire (cas par exemple des bassins non jaugés) à la même échelle voire à une autre échelle (région, ...).

De plus, les valeurs des paramètres calés dépendent des choix faits pour le calage: elles peuvent varier selon la période de référence, le critère de qualité (fonction-objectif), la méthode (manuelle, par essai/erreur; automatique, par optimisation; stochastique, de type "Monte-Carlo"). Il en résulte que des résultats numériquement très similaires peuvent être obtenus avec des jeux de paramètres différents, voire avec des modèles différents (reposant donc sur des hypothèses différentes). Et pourtant la réalité est unique: comment alors identifier le "bon" jeu de paramètres, le "bon" modèle?

Tant qu'un modèle conceptuel est utilisé comme un simple algorithme numérique (suffisamment souple grâce à ses paramètres de calage pour s'adapter à nombre de situations) pour seulement simuler les débits, cette

identification n'est pas obligatoire. Mais dès qu'on cherche aussi à expliquer ces débits en relation avec le fonctionnement interne du bassin, elle devient indispensable – surtout si ces simulations doivent servir à prendre des décisions d'aménagement du bassin: leur efficacité dépendra bien sûr de la pertinence de l'interprétation de la réalité sur laquelle repose le modèle.

Ces problèmes de transposabilité, de non-unicité ("*equifinality*") et d'identifiabilité des modèles (souvent surparamétrés, notamment s'ils sont semi-spatialisés) ne peuvent être limités qu'en réduisant leur nombre de degrés de liberté – par exemple en les contraignant à bien simuler non seulement les débits mais aussi d'autres variables (autres flux, stocks internes, concentrations, ...).

Ainsi, grâce au calage de ses quelques paramètres, un modèle conceptuel global de type "Horton" (Crabit, 2010) – supposant un ruissellement par dépassement de l'infiltrabilité généralisé sur l'ensemble du bassin – peut bien simuler les crues d'un bassin versant de type "Cappus", comme le petit bassin versant de recherches du Ringelbach (Hautes-Vosges, F) où les crues sont générées par un ruissellement de dépassement de la saturation sur les seules surfaces saturées (sur quelques % du bassin). Mais ce modèle conduisant à une "bonne" simulation des débits pour de "mauvaises" raisons ne pourra être rejeté comme non-réaliste qu'en considérant en plus des débits à l'exutoire les stocks hydriques du sol ou les niveaux piézométriques qui, eux, seront mal simulés.

### **Procédure de calage et validation**

Tout modèle est une hypothèse faite sur le fonctionnement de la réalité, et cette hypothèse doit être validée à la fois sur le terrain pour vérifier la pertinence des concepts utilisés et par simulation pour vérifier par rapport à des mesures la qualité des résultats obtenus. En hydrologie, le calage et la validation se font encore trop souvent sur les seuls débits à l'exutoire, alors que Klemeš (1986) a recommandé une procédure itérative multi-variables et multi-échelles beaucoup plus rigoureuse:

- calage sur un bassin et une période de référence, si possible par rapport à plusieurs variables ;
- validation sur d'autres périodes disponibles pour le même bassin ("*split-sample test*"), si possible par rapport à plusieurs variables du bassin, sans modifier le jeu de paramètres estimés ou calés ;

- transposition à d'autres bassins similaires ("*proxy-basin test*") et pour les périodes de référence disponibles, en conservant ou adaptant le jeu de paramètres précédent sans nouveau calage.

La modélisation du fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Fecht (F) à l'aide d'un modèle maillé à réservoirs (Ambroise et al., 1995) illustre l'intérêt de cette procédure encore trop peu utilisée, alors qu'elle permet de limiter aussi le problème de non-unicité. Les quelques paramètres n'ayant pu être reliés à des propriétés mesurables ont été calés sur une seule année et sur le seul bassin-test. Les procédures de discrétisation du bassin en unités hydrologiques homogènes et de paramétrisation à bases physiques de ces unités ont été validées sur les autres années disponibles pour le bassin-test et ses sous-bassins. Elles ont ensuite été transposées telles quelles à un autre bassin voisin. La validation ainsi faite à plusieurs échelles (bassin, sous-bassin, maille) et sur plusieurs variables (débits, stock d'eau du manteau neigeux, stock d'eau du sol) conduit à considérer avec une certaine confiance les cartes des stocks (neige, sol) et flux (débit, évapotranspiration) hydriques simulés par le modèle en chaque maille et pour chaque jour à l'échelle du bassin versant.

### **Estimation de l'incertitude**

Chaque étape de la modélisation conduit à des incertitudes et erreurs liées tant au modèle (structure choisie, approximations) qu'aux données (paramètres, conditions initiales, forçages) utilisés. Il est donc quelque peu paradoxal – et déontologiquement problématique si ces simulations doivent servir de base à des décisions d'aménagement ou de gestion – que dans un domaine aussi complexe et donc aussi sujet à l'incertitude que l'hydrologie, on se contente encore souvent d'une modélisation purement déterministe, capable seulement de fournir dans chaque cas UNE simulation.

Pour tenir compte de l'effet de ces incertitudes sur les simulations, il est évidemment, et heureusement, de pratique courante d'utiliser des coefficients de sécurité, mais ceux-ci sont souvent déterminés très grossièrement – ce qui revient en quelque sorte à nier la qualité de tout l'effort de modélisation préalable. Caractériser et quantifier cette incertitude, en déduire un intervalle de confiance des simulations constitue un thème de recherche prioritaire en hydrologie (Beven, 2009). Une piste possible est d'adopter une approche stochastique (de type "Monte-Carlo") de la paramétrisation des modèles déterministes, avec tirage au hasard d'un très

grand nombre de jeux de paramètres pour échantillonner tout l'espace des paramètres – chaque jeu donnant une simulation.

Dans le calage classique, seul est retenu le jeu de paramètres donnant numériquement la "meilleure" simulation par rapport à des mesures – elles-mêmes aussi entachées d'incertitude. Pour éviter de compenser toutes les incertitudes de la modélisation sur ces seuls paramètres, il semble plus judicieux de retenir comme "acceptables" toutes les simulations dépassant un certain seuil de qualité, choisi subjectivement. Les courbes enveloppes de ces simulations acceptables fournissent alors l'intervalle de confiance des simulations (Freer et al., 1996). Ceci conduit aussi à reconsidérer la façon "déterministe" de comparer simulations et observations : compte tenu de l'incertitude sur les paramètres, deux courbes simulée et observée peuvent s'avérer en fait non significativement différentes bien qu'éloignées et, inversement, significativement différentes bien que proches.

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Pour progresser, notamment en modélisation, l'hydrologie a besoin:

- d'une meilleure interaction entre réalité et modèle: observation et mesures in situ, expérimentation sur le terrain et au laboratoire, effort de formalisation et de modélisation sont indispensables et complémentaires, surtout si menés dès le départ en concertation ; la disponibilité de jeux de données de qualité reste bien sûr le "facteur limitant" de la modélisation.
- d'une approche plus largement interdisciplinaire, par le biais de collaborations entre disciplines et organismes: l'hydrologie a besoin de l'apport des sciences connexes (météorologie, climatologie, hydrodynamique, géophysique, géologie, géomorpho-pédologie, géochimie, géographie, écologie, ...); et d'un accès garanti et simplifié aux bases de données des services opérationnels.
- d'une meilleure synergie entre application et recherche:
  - l'ingénierie hydrologique ignorant encore trop les résultats des recherches et utilisant souvent, faute de mieux, des méthodes et outils reconnus pourtant comme peu réalistes;
  - la recherche hydrologique parvenant progressivement à démêler la complexité du réel, mais étant encore trop peu capable de traduire ses résultats en méthodes et modèles opérationnels.

Par leur quadruple fonction de laboratoire de terrain (mesures, expérimentations), de site de validation (méthodes, modèles), d'observatoire

du milieu (tendances à long terme) et de lieu de formation (universitaire, permanente), les bassins versants de recherche (BVR) sont – moyennant un investissement relativement limité, accessible à des organismes de recherche dans la plupart des pays – des outils privilégiés pour de telles études, surtout s'ils sont constitués de dispositifs emboîtés à plusieurs échelles et intégrés à des réseaux recoupant une large variété de milieux (Ambroise, 1994).

Trop longtemps pilotée par la solution immédiate des problèmes urgents à traiter, l'hydrologie a dû se satisfaire de solutions empiriques et globales, et de ce fait a été freinée dans son développement comme science. Fortement sollicitée depuis une vingtaine d'années par l'aggravation des questions d'environnement (dégradation des ressources par pollution et érosion, aléas tels qu'inondations et sécheresses, impacts des changements anthropiques ou climatiques,...) liées aux quatre fonctions que l'eau assure (comme ressource, agent, vecteur et milieu de vie), l'hydrologie connaît actuellement une nouvelle impulsion, qui l'oblige à une approche plus scientifique et plus complète du cycle de l'eau. C'est à ce prix qu'elle pourra notamment répondre à la problématique "Ressources en eau et Développement durable", particulièrement cruciale en milieu méditerranéen.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

*NOTE: Cet article reprend pour l'essentiel le texte d'une Conférence plénière lors du 4<sup>ème</sup> Colloque International CIREDD4 des 22-23/02/2011 à Alger (DZ)*

Ambroise B. (1994) *Du BVRE, Bassin versant représentatif et expérimental, au BVR, bassin versant de recherche*. In: Houi D. et Verrel J.L. (eds) "Du Concept de BVRE à celui de Zone-Atelier dans les Recherches menées en Eaux Continentales", Actes du Séminaire National "Hydrosystèmes", Paris, 10-11/5/1994, GIP Hydrosystèmes, CEMAGREF Éditions, 11-24.

Ambroise B. (1998) *Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux tempérés: 1. Processus et facteurs*. Revue des Sciences de l'Eau, 11(4):471-495.

Ambroise B. (1999a) *Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux tempérés: 2. Modélisation systémique et dynamique*. Revue des Sciences de l'Eau, 12(1):123-153.

Ambroise B. (1999b) *La Dynamique du Cycle de l'Eau dans un Bassin Versant – Processus, Facteurs, Modèles*. Éditions \*H\*G\*A\*, Bucarest (RO), 200 p.

- Ambroise B. (2004) *Variable "active" versus "contributing" areas or periods: a necessary distinction*. HP-Today Invited Commentary, Hydrological Processes, 18(6):1149-1155.
- Ambroise B., Perrin J.L., Reutenauer D. (1995) *Multicriterion validation of a semidistributed conceptual model of the water cycle in the Fecht catchment (Vosges Massif, France)*. Water Resources Research, 31(6):1467-1481.
- Beven K. J. (2009) *Environmental Modelling: An Uncertain Future? An Introduction to Techniques for Uncertainty Estimation in Environmental Prediction*. Routledge, Oxon (UK), 310 p.
- Beven K. J. (2012) *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer, Second Edition*. Wiley-Blackwell, Chichester (UK), 488 p.
- Boudevillain B. & Delrieu G. (2005) *Les événements pluvieux des 6-7 et 8-9 septembre 2005 dans le Gard*. Observatoire Hydrométéorologique Méditerranéen Cévennes-Vivarais, [http://www.ohmcv.fr/P511\\_rex2005.php?lang=fr](http://www.ohmcv.fr/P511_rex2005.php?lang=fr) .
- Cappus P. (1960) *Bassin expérimental d'Alrance - Étude des lois de l'écoulement - Application au calcul et à la prévision des débits*. La Houille Blanche N° A, 493-520.
- Crabit A. (2010) *Hydrologie de petits bassins versants non jaugés: problématique, caractérisation et modélisation*. Thèse de Doctorat, CIESSA Montpellier SupAgro, LISAH/INRA, Montpellier (F), 188 p.
- Freer J., Beven K. & Ambroise B. (1996) *Bayesian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: an application of the GLUE approach*. Water Resources Research, 32(7):2161-2173.
- Horton R.E. (1933) *The role of infiltration in the hydrological cycle*. Trans. American Geophysical Union, 14:446-460.
- Klemeš V. (1986) *Operational testing of hydrologic simulation models*. Hydrological Sciences Journal, 31(1):13-24.
- Thiéry J.M., d'Herbès, J.M. & Valentin C. (1995) *A model simulating the genesis of banded vegetation patterns in Niger*. Journal of Ecology, 83:497-507.

&amp;&amp;&amp;