



Sorbonne Université

Ecole doctorale Géosciences Ressources Naturelles et Environnement (ED 398)

INRAE – UR HYCAR (Antony)

De la robustesse des modèles hydrologiques face à des conditions climatiques variables

Par Paul Royer-Gaspard

Thèse de doctorat en hydrologie

Dirigée par Vazken Andréassian et Guillaume Thirel

Présentée et soutenue publiquement le 09/04/2021

Devant un jury composé de :

Gilles DROGUE , Professeur, Université de Lorraine, LOTERR	Rapporteur
Denis RUELLAND , Ingénieur de recherche, CNRS, HydroSciences Montpellier	Rapporteur
Agnès DUCHARNE , Directrice de recherche, CNRS, METIS	Examinatrice
Anne-Catherine FAVRE , Professeure, Université Grenoble-Alpes, IGE	Examinatrice
Joël GAILHARD , Ingénieur expert, EDF-DTG	Invité
Vazken ANDRÉASSIAN , Ingénieur en chef IPEF, INRAE, HYCAR	Directeur de thèse
Guillaume THIREL , Chargé de recherche, INRAE, HYCAR	Encadrant

Titre : De la robustesse des modèles hydrologiques face à des conditions climatiques variables

Mots-clés : modèles hydrologiques conceptuels, simulation, robustesse, calage-contrôle, procédures de calage, évaporation potentielle, structure des modèles

Résumé : Il est crucial de disposer d'outils fiables et robustes pour l'évaluation des risques hydrologiques et de la ressource en eau dans les bassins versants sujets à des changements de leurs conditions climatiques, afin que les politiques de gestion et de prévention soient efficaces. Le changement climatique d'origine anthropique en cours devrait particulièrement bouleverser le cycle de l'eau et ses dynamiques. Dans ce contexte, l'un des défis pour les modèles hydrologiques utilisés pour simuler ces effets sur le régime des cours d'eau est d'être capable de représenter adéquatement les processus hydrologiques dans de larges gammes de conditions climatiques. Les modèles actuels éprouvent cependant des difficultés à être performants dans ce registre. De nombreux travaux montrent de fait une difficulté générale à simuler les débits des cours d'eau en dehors des conditions rencontrées lors du calage de leurs paramètres. Les causes de ce manque de robustesse face à des conditions climatiques variables sont encore incertaines et peuvent être multiples : méthodes de calage des paramètres, erreurs dans les données, structures inadéquates... Dans cette thèse, une étude de ces causes est proposée afin d'identifier des solutions pour l'amélioration des modèles hydrologiques, en traitant les questions suivantes :

- Comment améliorer la robustesse des modèles hydrologiques sans modifier leurs équations et leur structure ?
- Peut-on identifier au sein d'un modèle hydrologique simple des défauts structurels limitant sa robustesse et peut-on les corriger ?

Des réponses à la première question ont été recherchées par l'analyse des performances de modèles hydrologiques conceptuels dans le cadre d'une procédure systématique de calage-contrôle sur un échantillon de 558 bassins versants français et australiens. D'abord, une étape de diagnostic des modèles hydrologiques a montré que les plus grandes difficultés étaient rencontrées par les modèles lors des variations de la relation précipitations-débit des bassins versants. Ensuite, une comparaison de différentes méthodes de calage a abouti au constat que le choix de la fonction objectif optimisée lors du calage avait une influence non négligeable sur la robustesse des modèles. L'emploi du critère de KGE calculé sur la racine carrée des débits apparaît à cet égard le choix le plus pertinent. Le choix de la formulation de l'évaporation potentielle est également un facteur important d'amélioration de la robustesse des modèles hydrologiques, bien que les résultats de la comparaison de plusieurs formulations soient assez hétérogènes sur l'échantillon d'étude. Malgré ces résultats encourageants, des choix adaptés de la méthode de calage et du calcul de l'évaporation potentielle ne permettent d'améliorer la robustesse des modèles que de manière marginale.

La deuxième question a suscité la mise en place d'une méthodologie de diagnostic des lacunes structurelles des modèles hydrologiques nuisant à leur robustesse. La méthode, fondée sur une analyse des compétitions entre les performances d'un modèle et de l'effet de ces compétitions sur ses états internes, a été appliquée au modèle GR4J. Deux défauts majeurs ont ainsi pu être identifiés dans la structure du modèle, limitant sa capacité à se montrer robuste pour la simulation simultanée de plusieurs gammes d'écoulement. Une tentative de modification via l'ajout d'un paramètre au modèle s'est révélée encourageante, bien que de faible influence sur les performances du modèle.

Malgré la modestie des progrès auxquels ils ont abouti, nous espérons que ces travaux pourront susciter de futurs développements de la structure des modèles hydrologiques, notamment pour la simulation des dynamiques interannuelles du comportement des bassins versants.

Title : Improving the robustness of hydrological models in varying climatic conditions

Key-words : conceptual hydrological modelling, simulation, robustness, split-sample test, calibration process, potential evaporation, model structure

Abstract : The reliability and the robustness of modelling tools used to assess hydrological risks and water resources in catchments facing climatic changes is critical to efficiently foster management and prevention policies. The current anthropogenic climate change should particularly unsettle the water cycle and its dynamics. Among the many challenges that climate change poses, the ability of hydrological models to adequately represent hydrological processes over a large range of climatic conditions is key to simulate climate change impacts on the regime of rivers. However, modern hydrological models still fail to perform well in such various situations. Many studies actually show a general difficulty to simulate river streamflow outside of the conditions experienced during model parameter calibration. The causes of this lack of robustness are yet uncertain and may be manifold: parameter calibration methods, measurement errors, inadequate model structure... This thesis aims at studying these causes in order to identify solutions for model improvement and strives to answer the following questions:

- Is it possible to improve hydrological model robustness without modifying model structure and equations?
- Can we identify structural weaknesses in hydrological models impacting its robustness and resolve them?

Answers to the first question were sought by analyzing the performances of a few hydrological models within the framework of a systematic split-sample calibration-evaluation experiment on a set of 558 catchments in France and Australia. Our diagnosis revealed that the hydrological models face major difficulties to simulate changes in catchments response to precipitation. The comparison of different calibration methods showed that the choice of the optimized objective function had a significant impact on model robustness. When computed on square-rooted streamflow, the KGE appeared as the most relevant choice. The way potential evaporation is computed also influences model robustness, although our comparison of a few potential evaporation models show rather heterogeneous results across the catchment set. In spite of encouraging results, only marginal improvements on model robustness were reached by a better selection of calibration techniques and potential evaporation models.

A method specifically designed to diagnose structural weaknesses impacting model robustness was proposed to answer the second question. The approach is based on an analysis of performance trade-offs in a multi-objective framework and of the effects of these trade-offs on model internal behaviour. It was applied to the GR4J model. A couple of major structural deficiencies was identified. These deficiencies likely prevent the model from providing robust simulations in different streamflow ranges simultaneously. An attempt to modify the structure of GR4J yielded to an encouraging yet modest improvement of its performance.

Despite the light enhancement of hydrological model robustness achieved in this work, it may pave the way to further advances. The results obtained on calibration techniques and potential evaporation computation could foster the elaboration of a more in-depth analysis of model weaknesses by partially removing these sources of uncertainty. We hope that our work may stimulate model structural development, particularly towards better representation of catchment interannual dynamics.