



HAL
open science

Etude de sensibilité globale comparée des modèles hydrologiques GRP et MORDOR-TS

Anne-Laure Tiberi-Wadier, Nicole Goutal, Sophie Ricci, Philippe Sergent, Julie Viatgé, Céline Monteil, François Bouttier

► To cite this version:

Anne-Laure Tiberi-Wadier, Nicole Goutal, Sophie Ricci, Philippe Sergent, Julie Viatgé, et al.. Etude de sensibilité globale comparée des modèles hydrologiques GRP et MORDOR-TS. LHB Hydroscience Journal, 2021, 107 (1), pp.1-11. 10.1080/27678490.2021.1977014 . hal-03520636

HAL Id: hal-03520636

<https://hal.science/hal-03520636>

Submitted on 11 Jan 2022

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

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



Etude de sensibilité globale comparée des modèles hydrologiques GRP et MORDOR-TS

Anne-Laure Tiberi-Wadier, Nicole Goutal, Sophie Ricci, Philippe Sergent, Julie Viatgé, Céline Monteil & François Bouttier

To cite this article: Anne-Laure Tiberi-Wadier, Nicole Goutal, Sophie Ricci, Philippe Sergent, Julie Viatgé, Céline Monteil & François Bouttier (2021) Etude de sensibilité globale comparée des modèles hydrologiques GRP et MORDOR-TS, LHB, 107:1, 1-11, DOI: [10.1080/27678490.2021.1977014](https://doi.org/10.1080/27678490.2021.1977014)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/27678490.2021.1977014>



© 2022 Cerema. Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group



Published online: 10 Jan 2022.



Submit your article to this journal [↗](#)



View related articles [↗](#)

Etude de sensibilité globale comparée des modèles hydrologiques GRP et MORDOR-TS

Anne-Laure Tiberi-Wadier^a, Nicole Goutal^b, Sophie Ricci^c, Philippe Sergent^d, Julie Viatgé^e, Céline Monteil^f and François Bouttier^g

^aCerema Risques, Eau et Mer, Plouzané, France ; ^bEDF R&D, Chatou, France ; ^cCECI, CNRS UMR 5318/CERFACS, Toulouse, France ; ^dCerema Risques, Eau et Mer, Margny-Lès-Compiègne, France ; ^eINRAE, Université Paris-Saclay, Antony, France ; ^fLaboratoire National d'Hydraulique et Environnement, EDF R&D LNHE, Chatou, France ; ^gCNRM, Toulouse University, Météo-France et CNRS, Toulouse, France

RESUME

L'étude des incertitudes de prévision est aujourd'hui largement développée pour les modèles météorologiques et hydrologiques. Les prévisions d'ensemble permettent dans une certaine mesure d'intégrer et de quantifier ces incertitudes dans les prévisions. Les incertitudes de prévision hydrologiques ont deux origines : (i) les incertitudes sur le forçage et (ii) les incertitudes hydrologiques qui regroupent les conditions initiales, la structure du modèle et ses paramètres. Les incertitudes peuvent être appréhendées grâce à une étude de sensibilité. Dans cet article, une étude de sensibilité globale est menée pour hiérarchiser les sources d'incertitudes en prévision des deux modèles hydrologiques GRP (modèle global) et MORDOR-TS (modèle semi-distribué). Les sources d'incertitudes prises en compte sont le forçage (précipitations) par l'utilisation des prévisions d'ensemble PEAROME et les paramètres des modèles. L'étude est réalisée sur trois sous-bassins du bassin versant de l'Odet situé dans le Finistère. Le calcul de la chronique temporelle des indices de Sobol est réalisé au cours de l'événement du 26 au 30 janvier 2016. Les résultats mettent en évidence une grande similarité dans la réponse des deux modèles. La source d'incertitude prépondérante concerne le bilan en eau des modèles. Nous mettons également en évidence une divergence des deux modèles en ce qui concerne le temps de réponse du sous-bassin versant Tréodet.

MOTS CLES

Étude de sensibilité globale ; indices de Sobol ; modèle hydrologique ; GRP ; MORDOR-TS ; bassin de l'Odet

KEYWORDS

Global Sensitivity Analysis; Sobol's indices; hydrological model; GRP; MORDOR-TS; Odet catchment

Comparative global sensitivity analysis on the hydrologic models GRP and MORDOR-TS

ABSTRACT

Today, forecast uncertainties are often provided together with meteorological or hydrologic forecasts. Generating ensemble forecasts covers this objective. Hydrologic forecast uncertainties can be classified into two classes: (i) input uncertainties, and (ii) hydrologic uncertainties, among which are the uncertainties on initial conditions, on the model structure and its parameters. The weight of the various sources of uncertainty can be assessed through sensitivity analysis. This article investigates hydrologic forecast uncertainties with a Global Sensitivity Analysis for the two hydrological models GRP (lumped) and MORDOR-TS (semi-distributed) applied on three sub-catchments of the Odet catchment (Brittany, France). Uncertainty sources taken into account are rainfall, with the use of the ensemble rainfall forecast PEAROME, and the models parameters. The Sobol indices time-series are computed over the event from the 26th to the 30th January 2016. Results highlight a similar behaviour in the response of the two models. It appears that the major uncertainty source comes from the water balance model component. It also appears that the response time for the Tréodet sub-catchment differs between both hydrological models.

1. Introduction

La fourniture des incertitudes liées aux prévisions est une pratique courante de nos jours : les prévisions météorologiques sont diffusées avec un indice de confiance et les Services de Prévision des Crues (SPC) produisent des prévisions avec incertitudes associées. Les sources d'incertitudes en hydrologie ont déjà été largement analysées. Krzysztofowicz (1999) les classe en deux groupes : (i) les incertitudes

sur le forçage et (ii) les incertitudes hydrologiques qui regroupent les conditions initiales, la structure du modèle et ses paramètres.

Les études de sensibilité permettent d'appréhender et de hiérarchiser les sources d'incertitudes. Les études de sensibilité globale permettent de décrire la réponse d'un modèle à une perturbation appliquée dans l'espace des entrées, lorsque celles-ci varient sur toute une gamme de valeurs spécifiées. Elles fournissent des indices de

sensibilité qui représentent l'importance de chaque entrée sur la valeur de la sortie. Dans cet article, une étude de sensibilité globale est réalisée sur les deux modèles hydrologiques GRP et MORDOR-TS, implémentés sur le bassin versant de l'Odet (Finistère), en tenant compte de l'incertitude sur les forçages et sur les paramètres des modèles. Ces deux modèles sont des modèles hydrologiques conceptuels à réservoirs. Le modèle non distribué GRP est développé par INRAE pour la prévision des crues, en collaboration avec le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI). Le modèle semi-distribué MORDOR-TS est développé par EDF-DTG pour la gestion de la ressource en eau pour l'hydro-électricité. Les deux modèles fonctionnent de manière continue et sont utilisés dans cette étude au pas de temps horaire. Leur module neige n'est pas activé du fait de la localisation côtière du bassin d'étude. L'identification et la hiérarchisation des sources d'incertitudes de ces modèles hydrologiques permettront ensuite de générer des prévisions d'ensemble hydrologiques.

Le bassin versant d'étude ainsi que les données utilisées pour l'étude sont présentés en partie II. La structure et le calage des modèles hydrologiques GRP et MORDOR-TS sont présentés en partie III. La partie IV est consacrée à la définition des indices de Sobol et à la description de l'espace incertain retenu pour l'étude d'incertitude des deux modèles. Enfin les résultats comparés des deux modèles sont présentés et analysés en partie V.

2. Bassin versant d'étude et données disponibles

2.1. Le bassin versant de l'Odet

L'Odet est une rivière côtière du Finistère. Elle traverse la ville de Quimper et son exutoire maritime est situé à Bénodet (marégraphe situé au lieu-dit Plaisance). La ville de Quimper est régulièrement touchée par des inondations dues à la concomitance de deux phénomènes : d'une part des pluies intenses sur l'ensemble du bassin versant, et d'autre part des marées hautes importantes, parfois amplifiées par des surcotes dues aux événements maritimes. L'Odet a deux affluents : le Steir et le Jet ([Figure 1](#)).

La surface totale du bassin versant est de 720 km². La modélisation hydrologique est réalisée sur les trois sous-bassins amont situés en tête de bassin : Odet amont (203 km², exutoire à Tréodet), Jet (108 km², exutoire à Kerjean) et Steir (181 km², exutoire à Ty-Planche).

2.2. Les données utilisées

2.2.1. Les mesures de pluies et de températures

Les pluies et températures sont utilisées comme entrées des modèles hydrologiques pour le calage et pour le rejeu sur la période historique. Les pluies sont les données

ANTILOPE (ANalyse par spaTiaLisation hORaire des PrEcipitations) (Champeaux et al., 2009) au pas de temps horaire et à une résolution kilométrique. La lame d'eau ANTILOPE est obtenue par fusion des données radar et des pluviomètres. Les pluviomètres au sol fournissent des observations ponctuelles des précipitations. Les radars fournissent une image détaillée et continue du champ de pluie. La calibration des radars est en particulier réalisée grâce aux observations des postes pluviométriques. Dans la suite de l'étude, les pluies ANTILOPE sont moyennées sur le bassin versant pour le modèle GRP et sur les mailles du modèle MORDOR-TS. Les températures de surface sont extraites de la réanalyse SAFRAN (Vidal et al., 2010), à une résolution de 8 km. Elles sont utilisées dans le modèle MORDOR-TS pour le calcul de l'évapotranspiration. Dans le modèle GRP, l'évapotranspiration potentielle (ETP) est calculée en fonction du jour de l'année à partir des valeurs utilisées lors de la phase de calage (moyenne journalière interannuelle), avec l'hypothèse simplificatrice que le remplacement de l'ETP datée par l'ETP moyenne interannuelle affecte peu le comportement du modèle en crue.

2.2.2. Les mesures de débit

Les débits aux exutoires des trois sous-bassins versants modélisés (Tréodet, Kerjean et Ty-Planche) sont extraits de la banque HYDRO (Leleu et al., 2014) (<http://www.hydro.eaufrance.fr>).

2.2.3. Les prévisions d'ensemble PEAROME

Les pluies utilisées pour alimenter les modèles hydrologiques en prévision sont les prévisions d'ensemble AROME appelées PEAROME dans la suite. Elles sont basées sur le modèle régional AROME (Seity et al., 2011), dont les perturbations sont destinées à représenter les incertitudes sur les conditions initiales, les conditions aux limites, les conditions de surface et l'incertitude sur le modèle météorologique lui-même (Bouttier et al., 2016, 2012 ; Raynaud & Bouttier, 2016). Chaque membre de la prévision d'ensemble AROME est forcé aux conditions limites du domaine par un membre des prévisions d'ensemble ARPEGE (Descamps et al., 2015).

Dans cette étude, les prévisions PEAROME sont composées de 12 membres équiprobables. Ils couvrent une surface de 1 800 km × 1 700 km centrée sur l'Europe de l'Ouest, intégrant le bassin versant d'étude. La résolution horizontale est 2,5 km. Les données utilisées couvrent l'événement présenté dans la suite de l'article, soit du 26 au 30 janvier 2016. Chaque jour à 21 h, une nouvelle simulation est disponible. Les prévisions sont au pas de temps horaire, sur une profondeur de 45 heures.

Les prévisions d'ensemble brutes issues des modèles de prévision du temps étant le plus souvent sous-dispersives et biaisées (Hamill & Colucci, 1997), il est nécessaire de les post-traiter avant leur utilisation

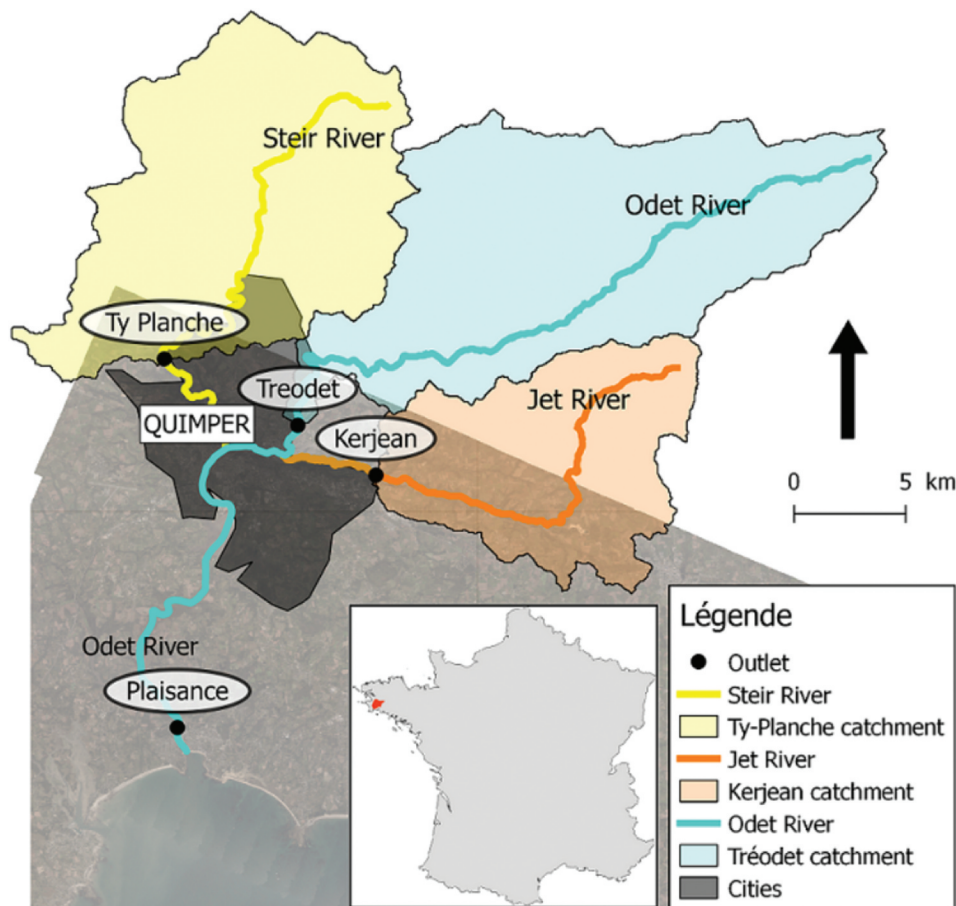


Figure 1. Bassin versant de l'Odet.

en entrée des modèles hydrologiques. Une calibration statistique a été réalisée selon la méthodologie décrite par Tiberi-Wadier et al. (2018).

3. Les modèles hydrologiques GRP et MORDOR-TS

Les paramètres des modèles sont tout d'abord calés sur chaque sous-bassin sur une période de 6 ans, du 1^{er} janvier 2007 au 31 décembre 2013 (simulation de référence) et validés sur la période du 1^{er} janvier 2014 au 31 mai 2017. D'une manière générale, sur la période de validation, les scores ne sont pas significativement dégradés par rapport à la période de calage, ce qui permet de valider le calage effectué (ces résultats ne sont pas présentés dans l'article). Dans un second temps, une série de calages est réalisée sur des périodes indépendantes de 2 ans entre 2007 et 2017 de manière à décrire l'incertitude sur chacun des paramètres, ce qui permettra de mener l'étude d'incertitude (cinq jeux de calage différents ont donc été générés).

Les deux modèles hydrologiques sont utilisés selon les préconisations de leurs développeurs. En particulier, les algorithmes de calage sont différents pour chacun des modèles. Le choix des métriques de calage

impacte directement les valeurs des paramètres calés. Néanmoins, nous avons fait le choix de travailler dans un contexte proche de l'opérationnel.

3.1. Description et calage du modèle GRP

Le modèle hydrologique GRP dérive du modèle GR4J (Perrin et al., 2003 ; Viatgé et al., 2019). Il est largement utilisé par les services de prévision des crues (SPC) au sein du réseau national de vigilance Vigicrue (<https://www.vigicrues.gouv.fr/>).

Le modèle GRP est forcé par la pluie horaire et par l'évapotranspiration potentielle. Il est composé d'un module de production et d'un module de routage (Figure 2) ; il a trois paramètres libres à caler (Tableau 1). Dans le module de production, la quantité totale d'eau allant alimenter l'écoulement est corrigée par le facteur *Corr*. Le module de routage permet de transférer la pluie efficace par l'intermédiaire de l'hydrogramme unitaire (temps de base T_B) et d'un réservoir de routage (capacité *Rout*).

Le modèle opérationnel inclut une étape d'assimilation du dernier débit observé (Berthet, 2010), ainsi qu'une exploitation de l'erreur du modèle (Tangara, 2005). Ces deux fonctionnalités ont été

désactivées pour l'étude de sensibilité qui a pour objectif de se focaliser sur le modèle seul, ses paramètres et son forçage.

Le calage des paramètres du modèle est réalisé en minimisant l'erreur quadratique moyenne (RMSE – Root Mean Square Error) entre les débits simulés et les observations supérieures au quantile q_{60} .

3.2. Description et calage du modèle MORDOR-TS

MORDOR-TS (Garavaglia et al., 2017 ; Garçon, 1996 ; Rouhier et al., 2017) est un modèle spatialisé dont les mailles sont reliées selon le réseau hydrographique. Il est forcé par la pluie horaire (P) et la température (T), toutes deux spatialisées sur le maillage. Il est composé d'un module de production dans lequel la production est calculée pour chaque maille (Figure 3). Le bilan en eau du modèle est corrigé par les paramètres c_p et k_{min} , ce dernier paramètre étant utilisé pour le calcul de l'évapotranspiration réelle (AET). Le module de production est ensuite composé de six réservoirs. Deux sont dédiés à la neige et la glace et sont désactivés ici. Les quatre autres représentent respectivement : (i) un réservoir superficiel U de capacité U_{max} (ii) un réservoir intermédiaire L de capacité L_{max} et dont le niveau de remplissage est contrôlé par le paramètre evl , (iii) un réservoir Z représentant le piégeage capillaire du sol de capacité Z_{max} et (iv) un réservoir profond N dont le niveau de remplissage est contrôlé par le paramètre lk_N . Trois flux sont transférés à partir du module de production vers le module de routage : le débit de surface Q_s , le débit de versant Q_v , et le débit de base Q_b . Le paramètre k_r contrôle la part de l'eau alimentant d'une part le réservoir N et d'autre part

directement le débit. Le module de routage permet de transférer la production de chaque maille jusqu'aux points de sortie du modèle. La fonction de transfert est issue du modèle de l'onde diffusante, avec la célérité Cel et la diffusion $Diff$ indépendants du débit (Hayami, 1951). Le modèle MORDOR-TS a ainsi dix paramètres libres à caler (Tableau 2).

Le calage des paramètres est réalisé grâce à l'algorithme génétique multi-objectif caRamel (Le Moine et al., 2015 ; Monteil et al., 2020). La fonction objectif regroupe trois scores : (i) Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) (Nash & Sutcliffe, 1970) sur les débits horaires, (ii) NSE sur le régime hydrologique (débits moyens journaliers) et (iii) NSE sur les débits classés.

4. Étude de sensibilité globale et indices de Sobol

4.1. Décomposition de la variance et indices de Sobol

Les études de sensibilité globale permettent de décrire la réponse du modèle lorsque ses paramètres d'entrée varient sur toute leur gamme d'incertitude. Elles fournissent des mesures de la contribution de chacun des paramètres incertains à la quantité d'intérêt (une variable de sortie du modèle). La propagation des incertitudes entre les espaces d'entrée et de sortie est réalisée grâce à un grand nombre de simulations. Parmi les méthodes existantes, les méthodes dites ANOVA (ANalysis Of VAriance) sont couramment employées : sous l'hypothèse que la distribution de la variable aléatoire de sortie est proche d'une distribution gaussienne, elles sont valides pour les modèles non-linéaires et non-monotones. Les méthodes

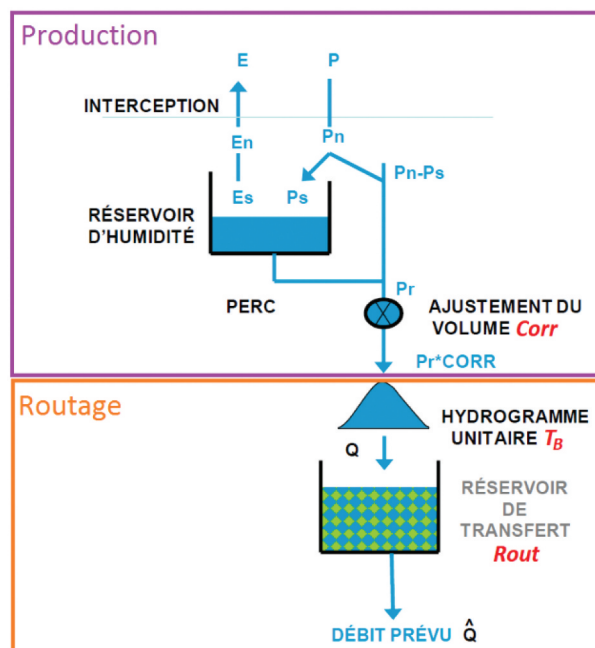


Figure 2. Schéma fonctionnel du modèle hydrologique GRP. D'après (IRSTEA, 2017).

ANOVA analyse la variance de la variable de sortie quand les paramètres d'entrée varient simultanément (Ferretti et al., 2016).

L'étude de sensibilité globale est réalisée ici grâce au calcul des indices de Sobol, sous l'hypothèse que les paramètres d'entrée sont indépendants. Soit un modèle f , son entrée $X=(X_1, \dots, X_k)$, k représentant le nombre de variables incertaines en entrée, et sa sortie $Y = f(X)$. Avec l'hypothèse que la variance de Y est finie, la décomposition de Hoeffding (1948) mène à la définition des indices de Sobol :

$$1 = \sum_i S_i + \sum_i \sum_{j>i} S_{i,j} + \dots + S_{1,2,3,\dots,k}$$

Tableau 1. Bilan des paramètres à caler dans le modèle GRP.

| Paramètre | Unité | Rôle |
|-----------|--------|---|
| $Corr$ | - | Coefficient correctif pour les précipitations |
| T_B | heures | Temps de base pour l'hydrogramme unitaire |
| $Rout$ | mm | Capacité du réservoir de routage |

où :

- (1) S_i est l'indice de Sobol du premier ordre de X_i ; il représente la contribution élémentaire de X_i à la variance totale $V(Y)$,
- (2) $S_{i,j}$ est l'indice de Sobol du second ordre de X_i et X_j ; il représente la contribution due aux interactions entre X_i et X_j à la variance totale $V(Y)$,

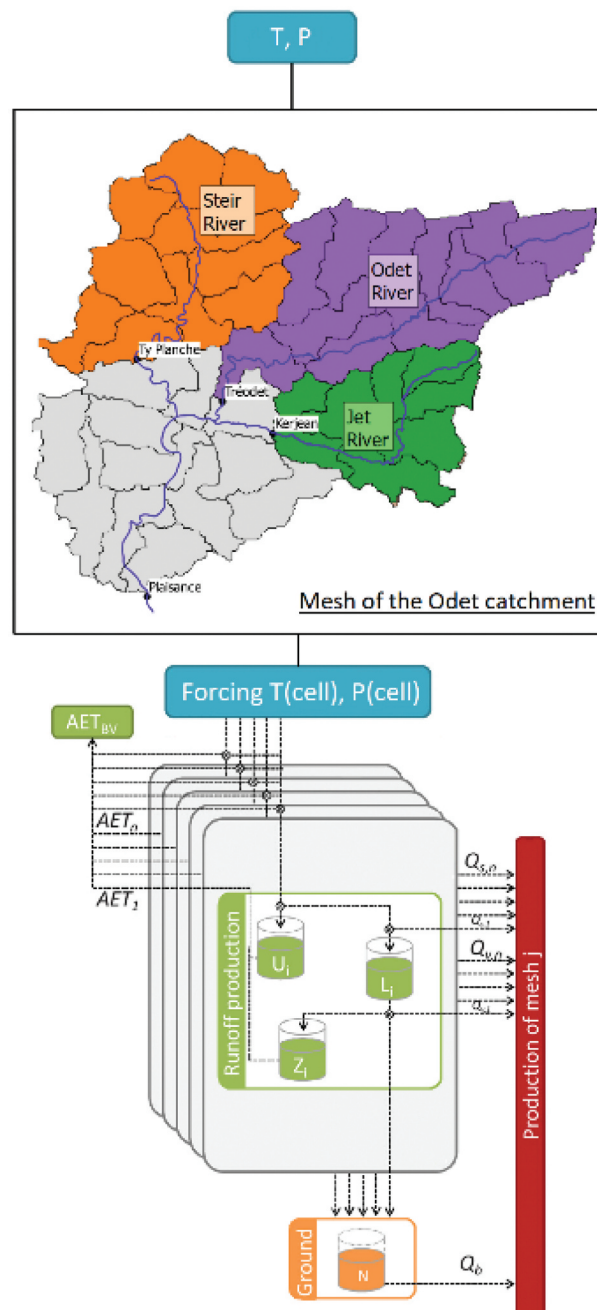


Figure 3. Schéma fonctionnel du modèle hydrologique MORDOR-TS. D'après (Rouhier et al., 2017).

Tableau 2. Bilan des paramètres à caler dans le modèle MORDOR-TS.

| Paramètre | Unité | Rôle |
|-----------|------------|---|
| C_p | - | Coefficient correctif pour les précipitations |
| k_{min} | - | Paramètre pour le coefficient cultural |
| U_{max} | mm | Capacité du réservoir de surface U |
| L_{max} | mm | Capacité du réservoir de intermédiaire L |
| ev_L | - | Exposant de vidage du stock intermédiaire L |
| Z_{max} | mm | Capacité du réservoir évaporant Z |
| k_r | - | Clé de répartition entre réservoir profond et ruissellement retardé |
| lk_N | - | Logarithme du coefficient de tarissement du réservoir profond N |
| Cel | $m.s^{-1}$ | Célérité de l'équation 1D de propagation (Hayami) |
| Diff | $m.s^{-1}$ | Diffusion de l'équation 1D de propagation (Hayami) |

(3) $S_{1,2, \dots, k}$ représente la contribution due aux interactions entre toutes les variables à la variance totale $V(Y)$.

Les indices de Sobol donnent ainsi une mesure de l'influence des différentes variables d'entrée et de leurs interactions sur la sortie. Plus l'indice de Sobol est grand, plus la variable est influente. Dans la suite de l'article, nous présentons uniquement les résultats du calcul des indices de Sobol du premier ordre. Nous avons vérifié que les chroniques des indices de Sobol totaux sont similaires à celles des indices de Sobol du premier ordre, ce qui montre qu'il n'y a pas d'interaction significative entre les entrées en termes d'impact sur les sorties.

4.2. Espace incertain pour les modèles hydrologiques

La quantité d'intérêt est le débit prévu à l'exutoire de chaque bassin versant à un instant donné. L'étude de sensibilité est donc menée de manière temporelle pour les trois stations Tréodet, Kerjean et Ty-Planche. Les paramètres incertains considérés sont : (i) la pluie utilisée à l'entrée des modèles, et (ii) les paramètres

libres de chaque modèle. Notons que les erreurs sur les paramètres et sur le forçage sont de nature différente. L'incertitude sur les paramètres est de nature épistémique, elle est liée à un manque de connaissance du système. L'incertitude sur les forçages est de nature aléatoire, elle est liée à la nature stochastique du système. L'incertitude sur les variables d'entrée est qualifiée de la manière suivante :

- (1) les prévisions PEAROME étant composées de 12 membres équiprobables, le scénario de pluie est tiré aléatoirement dans une loi uniforme discrète entre 1 et 12 ;
- (2) la plage de variation des paramètres des modèles est déterminée par une série de calages des modèles sur des périodes de 2 ans sur la période 2007–2017. Pour chaque paramètre, un tirage dans une loi uniforme continue sur la plage ainsi déterminée est réalisé. Même s'il est probable que les distributions des paramètres ne puissent pas être considérées comme uniformes à l'intérieur des bornes identifiées, ce choix de simplification a été réalisé en l'absence d'information permettant de déterminer la distribution adéquate. Les Tableaux 3 et 4 résument la plage de variation

Tableau 3. Bornes utilisées dans l'étude de sensibilité globale du modèle GRP et valeurs calées sur la période 2007–2013.

| Paramètre | Tréodet | | | Kerjean | | | Ty-Planche | | |
|-----------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|------------|--------|--------|
| | min | max | calage | min | max | calage | min | max | calage |
| $Corr$ | 0.92 | 1.19 | 1.01 | 0.92 | 1.14 | 0.98 | 0.88 | 1.17 | 0.96 |
| T_B | 4.39 | 9.58 | 7.26 | 0.5 | 1.7 | 0.5 | 0.5 | 5.11 | 1.7 |
| $Rout$ | 5884 | 11 614 | 8434 | 22 026 | 38 561 | 28 001 | 10 301 | 18 373 | 13 629 |

Tableau 4. Bornes utilisées dans l'étude de sensibilité globale du modèle MORDOR-TS et valeurs calées sur la période 2007–2013.

| Paramètre | Tréodet | | | Kerjean | | | Ty-Planche | | |
|-----------|---------|------|--------|---------|------|--------|------------|------|--------|
| | min | max | calage | min | max | calage | min | max | calage |
| C_p | 0.98 | 1.21 | 1.05 | 0.97 | 1.13 | 1.03 | 0.99 | 1.18 | 0.97 |
| k_{min} | 0.18 | 1.11 | 0.86 | 0.14 | 1.03 | 0.72 | 0.32 | 0.79 | 1.22 |
| U_{max} | 75 | 196 | 108 | 30 | 111 | 65 | 39 | 116 | 101 |
| L_{max} | 64 | 153 | 104 | 30 | 493 | 386 | 74 | 298 | 30 |
| ev_L | 3.95 | 4 | 3.99 | 1.5 | 3.98 | 1.5 | 3.38 | 4 | 2.85 |
| Z_{max} | 47 | 138 | 79 | 77 | 256 | 162 | 72 | 482 | 35 |
| k_r | 0.1 | 0.28 | 0.2 | 0.1 | 0.41 | 0.15 | 0.1 | 0.3 | 0.1 |
| lk_N | -5.8 | -5.2 | -5.45 | -6.2 | -5.5 | -5.94 | -5.7 | -5.4 | -5.75 |
| Cel | 0.44 | 0.56 | 0.52 | 0.45 | 1.1 | 0.9 | 0.5 | 0.55 | 0.42 |
| Diff | 1 | 659 | 422 | 1 | 5000 | 595 | 329 | 731 | 1645 |

des paramètres pour les modèles GRP et MORDOR-TS ainsi que les valeurs calées sur la période 2007-2013 pour les trois sous-bassins étudiés. Nous mettons en évidence que pour le modèle MORDOR-TS, certaines valeurs du calage global sont en dehors des bornes retenues avec les calages successifs. Ceci peut éventuellement être dû à des problèmes d'équifinalité, donc au fait que des jeux de paramètres différents peuvent obtenir de bons scores de calage.

Il est à noter que les algorithmes de calage utilisés induisent une dépendance entre les valeurs des paramètres calés. Par ailleurs, les paramètres optimisés sont bien sûr dépendants du choix du forçage de pluie utilisé pour le calage. Néanmoins, dans l'exercice proposé ici, cette dépendance est négligée. Nous faisons l'hypothèse que toutes les variables sont indépendantes, la valeur des paramètres comme le choix de la chronique de pluie, ce qui permet de retrouver les hypothèses du calcul des indices de Sobol.

4.3. Simulations cyclées

L'étude de sensibilité est réalisée en se plaçant dans des conditions proches du contexte opérationnel : les modèles hydrologiques sont alimentés avec les mesures de pluie (ANTILPE) et de température (SAFRAN) jusqu'au lancement de la prévision, puis par les prévisions PEAROME. En prévision, les données SAFRAN sont toujours utilisées pour la température. On n'est donc pas à proprement parler dans un contexte opérationnel, mais l'étude de sensibilité se focalise sur les pluies. Dans le mode rejeu appliqué ici, après une année d'initialisation, les conditions initiales sont successivement reprises des pas de temps antérieurs et les simulations sont réalisées de manière cyclée (Figure 4).

Pour chaque membre perturbé, on détermine d'abord ses caractéristiques (valeurs des paramètres du modèle, choix de la pluie PEAROME). Puis, pour tous les pas de temps dans la fenêtre définie pour l'étude de sensibilité, on lance une prévision de 45 heures alimentée par la PEAROME. Le calcul des indices de Sobol peut donc être effectué par échéance de prévision.

Nous pouvons noter que chaque heure est simulée 45 fois (pour chaque échéance de prévision). Nous nous sommes assurés de la convergence du calcul des indices de Sobol par rapport au nombre de simulations N_{sim} . Chaque heure est donc simulée $45 \cdot N_{sim}$ fois. Le nombre de simulations lancées pour les deux modèles sont respectivement 50 000 pour le modèle GRP et 192 000 pour le modèle MORDOR-TS. Le nombre de simulations est plus important pour le modèle MORDOR-TS car l'étude de sensibilité globale tient compte de davantage de paramètres incertains.

5. Résultats comparés

Les chroniques de débit (Figure 5) et d'indices de Sobol (Figure 6) sont analysées pour les deux échéances de prévision de 6 heures et 21 heures pendant l'événement du 26 au 30 janvier 2016 à Tréodet. Sur la Figure 5, une coupe verticale à une date donnée représente la densité de probabilité (pdf) de la prévision. Rappelons que les deux modèles sont appliqués sans assimilation de données de débit.

5.1. Similarités dans les réponses des modèles GRP et MORDOR-TS

La Figure 5 montre que les deux modèles sous-estiment le pic de débit, puisque l'observation est dans la partie haute des pdfs. Cette sous-estimation est plus importante pour le modèle GRP.

En ce qui concerne la sensibilité aux paramètres (Figure 6), pour les deux modèles, le débit simulé est majoritairement contrôlé par le bilan en eau du modèle, qui dépend de deux paramètres : (i) le coefficient correctif des précipitations (*Corr* pour GRP, c_p pour MORDOR-TS), et (ii) la pluie qui force le modèle en prévision. Quand il ne pleut pas, le débit simulé est très fortement déterminé par le coefficient correctif des précipitations : celui-ci impacte la quantité d'eau entrée dans le modèle lors de pluies précédentes et impacte ainsi la valeur de l'écoulement de base. Les indices de Sobol de *Corr* et c_p avant et après l'événement sont alors prépondérants sur celui des autres paramètres. Nous notons que l'influence du coefficient correctif de précipitations est du même ordre à courte et longue échéance. Quand il pleut, l'importance de ce paramètre décroît au profit du choix du membre de la pluie PEAROME. Nous remarquons que l'importance du choix du membre augmente avec l'échéance de prévision étudiée : ceci s'explique par le fait que plus l'échéance est importante, plus il y a de différences entre deux modèles alimentés par des scénarios de pluie différents, puisque la différence de quantité d'eau totale qui entre dans le modèle augmente avec la durée d'intégration. Le choix du membre ainsi que sa durée d'intégration contrôlent, de la même manière que le coefficient correctif pour les précipitations, le bilan en eau du modèle.

Nous notons également qu'à longue échéance, la courbe représentant l'indice de Sobol de la pluie a la même forme pour les deux modèles. L'indice de Sobol de la pluie devient négligeable environ 21 heures après la fin de la pluie à l'échéance 21 heures. À cette échéance, la PEAROME a été intégrée pendant 21 heures. Il faut donc attendre 21 heures après la fin de la pluie pour que la chronique intégrée par tous les membres soit nulle, dont la conséquence est un indice de Sobol de la pluie négligeable.

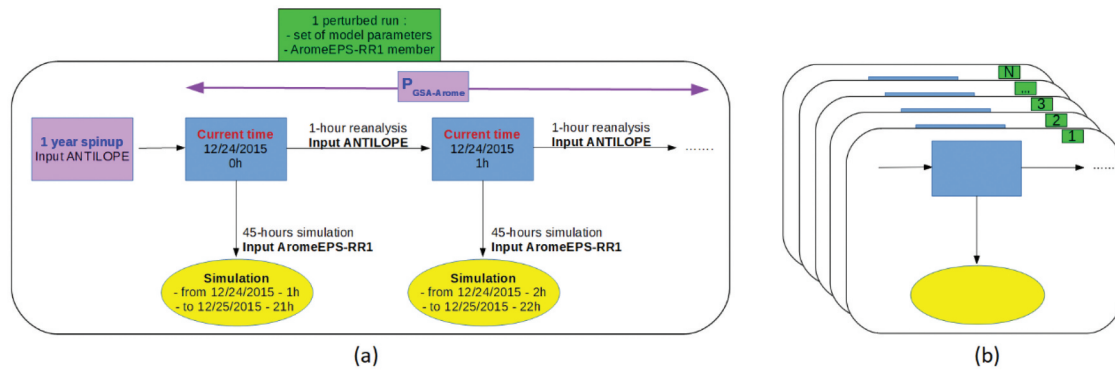


Figure 4. Simulations cyclées pour l'étude d'incertitude. (a) : une simulation cyclée. (b) N_{sim} simulations cyclées pour le calcul des indices de Sobol.

Dans une moindre mesure, à l'échance 6 heures, la valeur du débit simulé en début d'événement dépend de la capacité du réservoir qui alimente directement le débit. On note en effet une augmentation de la valeur de l'indice de Sobol du paramètre $Rout$ pour GRP et L_{max} pour MORDOR-TS en début d'événement. Nous notons que la valeur de l'indice de Sobol redevient quasiment nulle avant la fin de l'événement.

5.1.1 Différences dans les réponses des deux modèles

En dehors des similarités décrites précédemment, nous mettons également en évidence une différence de réaction entre les deux modèles. Avec le modèle MORDOR-TS à l'échance de prévision de 6 heures, l'impact du choix du membre de la pluie a très peu d'influence, l'indice de Sobol de la pluie reste très

faible. En revanche, pour le modèle GRP, le choix de la pluie a déjà beaucoup plus d'importance. Comme nous l'avons vu, pour une échance de 21 heures, les deux modèles ont la même sensibilité au choix de la pluie. Ainsi, il apparaît que le temps de réponse du bassin versant modélisé dans le modèle GRP semble plus court que celui modélisé par le modèle MORDOR-TS.

5.2. Spécificités pour chaque modèle

5.2.1. Modèle GRP

Nous notons que l'indice de Sobol du paramètre T_B a très peu d'influence sur le débit simulé. Le seul moment où cet indice n'est pas quasiment nul est au tout début des événements, quand il y a davantage d'eau à transférer au réservoir de routage, pour des courtes échances.

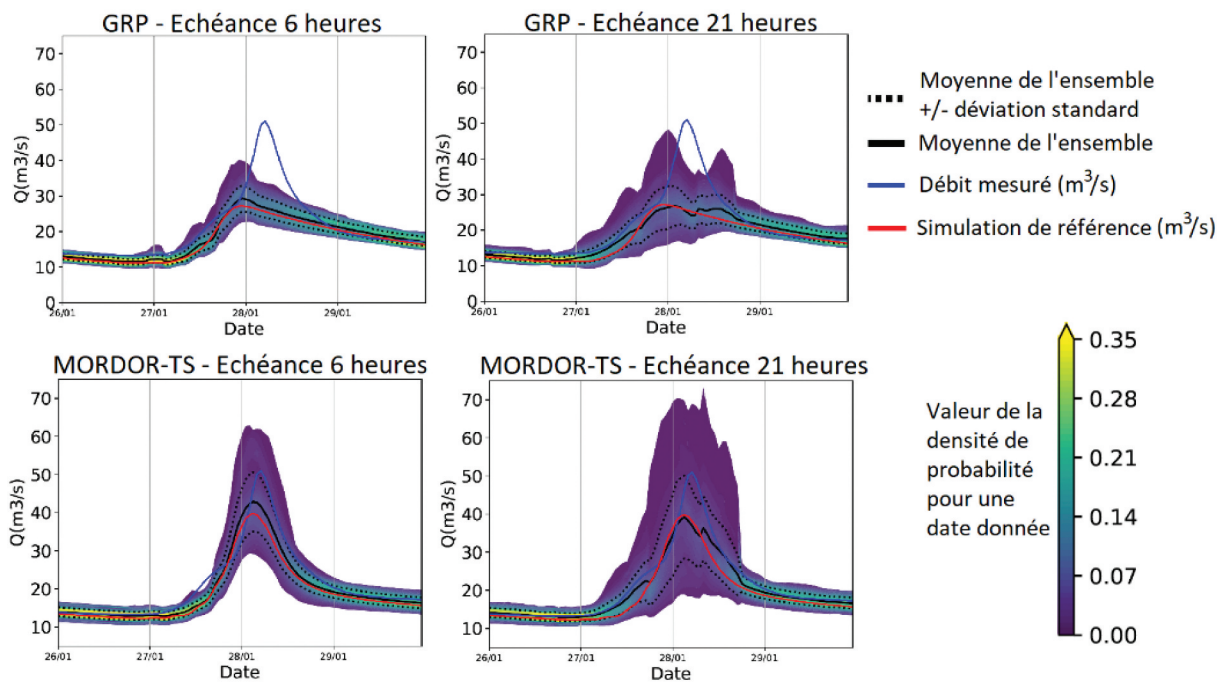


Figure 5. Chroniques de débits pour les modèles GRP et MORDOR-TS à la station Tréodet pour l'événement du 26/01/2016 au 30/01/2016 La courbe bleue représente la mesure et la courbe rouge la simulation avec le modèle calé. Une coupe verticale à une date donnée représente la densité de probabilité de la prévision.

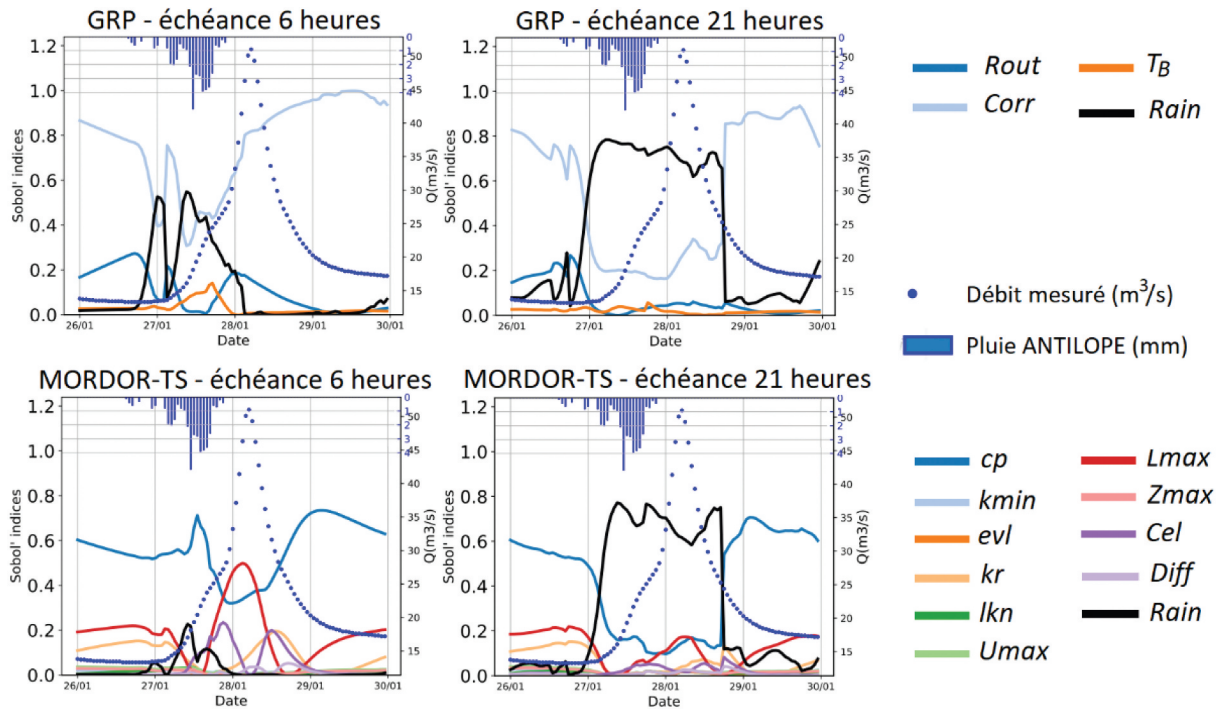


Figure 6. Indices de Sobol en prévision pour les modèles GRP et MORDOR-TS à la station Tréodet pour l'événement du 26/01/2016 au 30/01/2016 aux échéances 6 heures et 21 heures.

5.2.2. Modèle MORDOR-TS

À l'échéance de prévision de 6 heures, le paramètre Cel prend de l'importance deux fois au cours de l'événement : lors de la montée de crue et lors de la descente de crue. La fonction responsable du routage de l'eau produite dans les mailles est donc particulièrement importante lorsque le gradient de débit à l'exutoire est important.

La valeur du paramètre k_r prend de l'importance au pic d'événement, ou légèrement après. En effet, quand le réservoir Z est plein ou quasiment plein, la quantité d'eau refoulée par Z nommée out_Z est plus importante. Sachant que la quantité $k_r * out_Z$ alimente directement le débit simulé, l'importance de k_r augmente alors.

Pour finir, nous notons des indices de Sobol quasiment nuls pour les paramètres k_{min} et $Diff$. Ceci est également vrai sur les deux autres sous-bassins Kerjean et Ty-Planche dont les résultats ne sont pas montrés ici. Ces deux paramètres n'ont donc pas d'influence sur les débits simulés dans les gammes de variation qui ont été fixées ici.

6. Conclusions

Dans cette étude, nous avons cherché à qualifier les incertitudes des deux modèles hydrologiques GRP et MORDOR-TS. Nous avons développé une méthodologie commune pour déterminer la plage de variation des paramètres des deux modèles hydrologiques. Les résultats de l'étude de sensibilité globale mettent en évidence une réponse des modèles

relativement similaire par rapport aux différents paramètres, bien que les deux modèles hydrologiques soient différents dans leur complexité : modèle spatialisé ou non, un seul ou plusieurs réservoirs de production. Nous avons mis en évidence que les deux modèles ont tendance à sous-estimer le pic de débit de l'événement étudié, que ce soit pour les modèles déterministes (modèles calés) ou ensembliste (pdf). Par ailleurs, il s'avère que le débit simulé est déterminé de manière prépondérante par la quantité d'eau qui entre dans le modèle, contrôlée par le coefficient correctif des précipitations et par le choix de la chronique de prévision de pluie. Les résultats de l'analyse de sensibilité globale menée sur les deux autres sous-bassins de l'Odette (Kerjean et Ty-Planche) et sur un autre événement (du 3 au 7 janvier 2016) tendent à confirmer les résultats présentés ici. On ne note en effet pas de différence notable de comportement pour le modèle GRP. L'analyse des résultats du modèle MORDOR-TS met en évidence des petites nuances de comportement : l'indice de Sobol du coefficient correctif pour les précipitations n'est pas toujours prépondérant mais reste toujours parmi les plus significatifs. Dans tous les cas étudiés, on note une importance croissante de L_{max} en montée de crue. On note toujours une importance inversée entre c_p et le choix de la pluie.

Cette étude permet d'introduire la méthodologie (choix des variables incertaines, densités de probabilité et hyper-paramètres associés, c'est-à-dire les caractéristiques des lois de distribution telles que la moyenne, l'écart-type ou les bornes) de manière assez complète pour créer dans un second temps des

prévisions d'ensemble hydrologiques. Des compléments permettraient de l'affiner. On pourrait par exemple travailler avec des ensembles de jeux de paramètres issus du front de Pareto construit lors du calage du modèle MORDOR-TS.

7. Remerciements

Les auteurs remercient le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI), EDF-DTG pour la fourniture du modèle MORDOR-TS ainsi que Rémy Garçon et Matthieu Le Lay, Fabrice Zaoui pour le développement de l'interface python pour MORDOR-TS, INRAE pour la mise à disposition du modèle GRP ainsi que Charles Perrin, Maxime Taillardat (Météo-France) pour la calibration statistique des PEAROME, et Laurent Colonnelle pour son aide à la construction et au calage du modèle MORDOR-TS sur le bassin de l'Odette. Les auteurs remercient également le Pôle de Calcul et de Données Marines (PCDM) pour fournir Datarmor (stockage, ressources de calcul). Les auteurs remercient enfin les deux relecteurs anonymes pour leurs suggestions qui ont permis d'améliorer la qualité de l'article.

ORCID

François Bouttier  <http://orcid.org/0000-0001-6148-4510>

Références

- Berthet, L. (2010). Prévision des crues au pas de temps horaire : Pour une meilleure assimilation de l'information de débit dans un modèle hydrologique Theses. AgroParisTech. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00529652>.
- Bouttier, F., Raynaud, L., Nuissier, O., & Ménétrier, B. (2016). Sensitivity of the AROME ensemble to initial and surface perturbations during HyMeX. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(S1), 390–403. <https://doi.org/10.1002/qj.2622>
- Bouttier, F., Vié, B., Nuissier, O., & Raynaud, L. (2012, novembre). Impact of stochastic physics in a convection-permitting ensemble. *Monthly Weather Review*, 140(11), 3706–3721. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00031.1>
- Champeaux, J.-L., Dupuy, P., Laurantin, O., Soulan, I., Tabary, P., & Soubeyroux, J.-M. (2009, octobre). Les mesures de précipitations et l'estimation des lames d'eau à Météo-France : état de l'art et perspectives. *La Houille Blanche*, 95(5), 28–34. <https://doi.org/10.1051/lhb/2009052>
- Descamps, L., Labadie, C., Joly, A., Bazile, E., Arbogast, P., & Cébron, P. (2015). PEARP, the Météo-France short-range ensemble prediction system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141(690), 1671–1685. <https://doi.org/10.1002/qj.2469>
- Ferretti, F., Saltelli, A., & Tarantola, S. (2016). Trends in sensitivity analysis practice in the last decade. *Science of the Total Environment*, 568, 666–670. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.133>
- Garavaglia, F., Le Lay, M., Gottardi, F., Garçon, R., Gailhard, J., Paquet, E., & Mathevet, T. (2017, août). Impact of model structure on flow simulation and hydrological realism: From a lumped to a semi-distributed approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(8), 3937–3952. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3937-2017>
- Garçon, R. (1996, août). Prévision opérationnelle des apports de la Durance à Serre-Ponçon à l'aide du modèle MORDOR. Bilan de l'année 1994-1995. *La Houille Blanche*, 82(5), 71–76. <https://doi.org/10.1051/lhb/1996056>
- Hamill, T. M., & Colucci, S. J. (1997, juin). Verification of Eta-RSM short-range ensemble forecasts. *Monthly Weather Review*, 125(6), 1312–1327. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1997\)125<1312:VOERSR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125<1312:VOERSR>2.0.CO;2)
- Hayami, S. (1951, décembre). On the propagation of flood waves. *Disaster prevention research institute*. Kyoto, Japan: Kyoto University <https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/123641/1/b01p0n000p01.pdf>
- Hoeffding, W. (1948). A class of statistics with asymptotically normal distribution. *The Annals of Mathematical Statistics*, 19(3), 293–325. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177730196>
- IRSTEA. (2017). *Calage et application opérationnelle du modèle de prévision de crue GRP – Manuel d'utilisation*.
- Krzysztofowicz, R. (1999, septembre). Bayesian theory of probabilistic forecasting via deterministic hydrologic model. *Water Resources Research*, 35(9), 2739–2750. <https://doi.org/10.1029/1999WR900099>
- Le Moine, N., Hendrickx, F., Gailhard, J., Garçon, R., & Gottardi, F. (2015, décembre). Hydrologically aided interpolation of daily precipitation and temperature fields in a Mesoscale Alpine Catchment. *Journal of Hydrometeorology*, 16(6), 2595–2618. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0162.1>
- Leleu, I., Tonnelier, I., Puechberty, R., Gouin, P., Viquendi, I., Cobos, L., Foray, A., Baillon, M., & Ndimba, P.-O. (2014). La refonte du système d'information national pour la gestion et la mise à disposition des données hydrométriques. *La Houille Blanche*, 100(1), 25–32. <https://doi.org/10.1051/lhb/2014004>
- Monteil, C., Zaoui, F., Le Moine, N., & Hendrickx, F. (2020). Multi-objective calibration by combination of stochastic and gradient-like parameter generation rules – The CaRamel algorithm. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(6), 3189–3209. <https://doi.org/10.5194/hess-24-3189-2020>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970, avril). River flow forecasting through conceptual models Part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1), 275–289. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7)
- Raynaud, L., & Bouttier, F. (2016). Comparison of initial perturbation methods for ensemble prediction at convective scale. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(695), 854–866. <https://doi.org/10.1002/qj.2686>
- Rouhier, L., Le Lay, M., Garavaglia, F., Le Moine, N., Hendrickx, F., Monteil, C., & Ribstein, P. (2017, octobre). Impact of mesoscale spatial variability of climatic inputs and parameters on the hydrological response. *Journal of Hydrology*, 553, 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.037>

- Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., Lac, C., & Masson, V. (2011, mars). The AROME-France convective-scale operational model. *Monthly Weather Review*, 139(3), 976–991. <https://doi.org/10.1175/2010MWR3425.1>
- Tangara, M. 2005. Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global. Thèse de doctorat, école pratique des hautes études de Paris. <http://www.theses.fr/2005EPHEA002>
- Tiberi-Wadier, A.-L., Taillardat, M., Goutal, N., Ricci, S., Sergent, P., Bouttier, F., & Le Pape, E. (2018). *Vers une approche ensembliste de la prévision des crues*. Actes du colloque de la Société Hydrotechnique de France.
- Viatgé, J., Pinna, T., Ficchi, A., Perrin, C., Dorchie, D., Garandeau, L., & Tilmant, F. 2019. Vers une plus grande flexibilité temporelle du modèle opérationnel de prévision des crues GRP. *La Houille Blanche*. 72–80. <https://doi.org/10.1051/lhb/2019017>
- Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., & Soubeyrou, J.-M. (2010, septembre). A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the SAFRAN system. *International Journal of Climatology*, 30(11), 1627–1644. <https://doi.org/10.1002/joc.2003>