



**HAL**  
open science

**Projet HYDRODEMO Évaluation de l'aléa torrentiel  
dans les petits bassins versants des Alpes du Nord  
Action 4: Développer un cadre de modélisation  
hydrologique pour les petits bassins versants torrentiels**

F. Colleoni, Alexandre Mas, Catherine Fouchier, Guillaume Evin

► **To cite this version:**

F. Colleoni, Alexandre Mas, Catherine Fouchier, Guillaume Evin. Projet HYDRODEMO Évaluation de l'aléa torrentiel dans les petits bassins versants des Alpes du Nord Action 4: Développer un cadre de modélisation hydrologique pour les petits bassins versants torrentiels. [Rapport de recherche] INRAE. 2022. hal-03671653

**HAL Id: hal-03671653**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03671653>**

Submitted on 18 May 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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



## **Projet HYDRODEMO**

### **Évaluation de l'aléa torrentiel dans les petits bassins versants des Alpes du Nord**

**Action 4 : Développer un cadre de modélisation hydrologique pour les petits bassins versants torrentiels**



# Projet HYDRODEMO Évaluation de l'aléa torrentiel dans les petits bassins versants des Alpes du Nord

## Action 4 : Développer un cadre de modélisation hydrologique pour les petits bassins versants torrentiels

François Colleoni<sup>1</sup>, Alexandre Mas<sup>2</sup>, Catherine Fouchier<sup>1</sup> et Guillaume Evin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*INRAE, Aix Marseille Univ – RECOVER*

<sup>2</sup>*Univ. Grenoble Alpes, INRAE, UR ETNA, 3800, Grenoble, France*

18 mai 2022



EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

**Financement :** Projet financé avec le concours de l'Union européenne. L'Europe s'engage sur le Massif Alpin avec le Fonds Européen de Développement Régional. Opération soutenue par l'Etat - Fonds national d'aménagement et de développement du territoire.

---

**Citation :** F. Colleoni, Mas, A., Fouchier, C. et Evin, G. 2021. *HYDRODEMO / Action 4 : Développer un cadre de modélisation hydrologique pour les petits bassins versants torrentiels* [Research report] INRAE - RECOVER et INRAE - ETNA.

---

## Résumé

Le projet HYDRODEMO a pour objectif de mieux connaître les risques liés aux crues torrentielles dans les Alpes du Nord et de pouvoir mieux s'en prémunir. Le manque d'observations hydrométéorologiques dans les Alpes du Nord, que ce soit en termes de forçages météorologiques ou hydrologiques, limite fortement nos connaissances sur ce type d'aléa. Afin de combler ce manque de connaissance, l'action 4 du projet HYDRODEMO, objet de ce présent rapport, consiste à appliquer des outils de modélisation hydrologique à des petits bassins versants torrentiels instrumentés pour, d'une part, tenter d'en caractériser et reproduire le fonctionnement, et, d'autre part, définir une méthodologie de transposition aux bassins versants non instrumentés sous la forme d'un travail de régionalisation des paramètres des modèles. L'objectif associé à cette régionalisation est d'étudier la possibilité de la mise en œuvre des modèles sur les bassins versants non instrumentés, afin d'y permettre la connaissance de valeurs statistiques de crues.

Pour répondre à ces objectifs, ce rapport présente l'application de deux modèles hydrologiques, le modèle semi-distribué MORDOR-SD adapté aux zones de montagne (modules neige et glace) et le modèle distribué SMASH<sup>1</sup> dont l'adaptation aux zones de montagne a pu être réalisée dans le cadre du projet HYDRODEMO, par le biais notamment de l'introduction d'un module neige. Pour les deux modèles, le développement de la méthodologie et l'évaluation des performances sont effectués sur un ensemble de bassins versants torrentiels jaugés des Alpes du Nord. Nous montrons en particulier la sensibilité des performances aux types de forçage météorologique et à la stratégie d'estimation des paramètres (calibration à partir des mesures de débit versus méthode de régionalisation). Le travail de régionalisation mené pour les deux modèles permet d'envisager des pistes pour leur mise en œuvre sur des bassins versants non jaugés.

Ce rapport s'organise en quatre parties avec :

- une première partie (chapitres 1 à 3) consacrée à la présentation des données et outils de modélisation ainsi que des différentes méthodes d'évaluation des performances des modèles,
- une seconde partie consacrée aux travaux menés successivement sur le modèle MORDOR-SD (chapitre 4) et sur le modèle SMASH (chapitre 5),
- une troisième partie (chapitre 6) consacrée à l'intercomparaison des résultats des modèles,
- une dernière partie (chapitre 7) apportant une mise en perspective par rapport aux dispositifs opérationnels disponibles sur le territoire national pour l'anticipation temps réel des crues (Vigicrues Flash) et la connaissance statistique des débits de crues (Shyreg).

---

1. SMASH : Spatially-distributed Modelling and ASsimilation for Hydrology, plateforme développée par INRAE avec le soutien du Ministère de la Transition Ecologique et mise en œuvre dans le dispositif national Vigicrues Flash.

## Remerciements

Ces travaux ont été menés conjointement avec EDF-DTG qui ont gracieusement mis à disposition leurs outils (modules de calibration et d'évaluation de MORDOR-SD) et leur expertise pour ces travaux. Nous remercions en particulier Matthieu Le Lay pour sa disponibilité et ses nombreux conseils.

## Table des matières

Remerciements . . . . .	4
<b>1 Introduction</b>	<b>7</b>
1.1 Le projet HYDRODEMO . . . . .	7
1.2 Pourquoi l’Action 4 : Développer un cadre de modélisation hydrologique pour les petits bassins versants torrentiels ? . . . . .	8
<b>2 Méthodes et données</b>	<b>9</b>
2.1 Méthodologie . . . . .	9
2.2 Rappel sur les données . . . . .	9
2.2.1 Forçages climatiques . . . . .	9
2.2.2 Données hydrologiques . . . . .	10
2.2.3 Échantillons de bassins versants . . . . .	10
<b>3 Évaluation des performances</b>	<b>15</b>
3.1 Sensibilité à la méthode d’estimation des paramètres . . . . .	15
3.1.1 Calage - validation . . . . .	15
3.1.2 Calage période complète . . . . .	16
3.1.3 Contexte non jaugé . . . . .	16
3.2 Critères de performances . . . . .	17
<b>4 MORDOR-SD</b>	<b>19</b>
4.1 Historique et description du modèle . . . . .	19
4.2 Choix des paramètres calés . . . . .	19
4.3 Estimation des paramètres en contexte jaugé . . . . .	21
4.4 Réduction de la dimension en contexte non-jaugé . . . . .	22
4.4.1 Paramètres fixés ou déterminés à partir de descripteurs de bassins . . . . .	22
4.4.2 Régionalisation des paramètres restants . . . . .	23
<b>5 SMASH</b>	<b>25</b>
5.1 Présentation du modèle . . . . .	25
5.2 Méthodologie de calibration du modèle . . . . .	27
5.2.1 Calage spatialement uniforme . . . . .	27
5.2.2 Calage spatialement distribué . . . . .	27
5.3 Tests d’hypothèse et amélioration de la structure du modèle SMASH en calage spatialement uniforme . . . . .	28
5.3.1 Module neige . . . . .	28
5.3.2 Hydrologie . . . . .	30
5.3.3 Synthèse . . . . .	33
<b>6 Intercomparaison des résultats des modèles</b>	<b>35</b>
6.1 Performances comparées en calage-validation . . . . .	35
6.1.1 Performances globales . . . . .	35
6.1.2 Critères de contingence . . . . .	37
6.2 Performances comparées au calage période complète . . . . .	38
6.2.1 Performances globales . . . . .	38



6.2.2 Critères de contingence . . . . .	40
6.3 Performances comparées en contexte non jaugé . . . . .	40
6.4 Performances comparées sur le calcul des quantiles . . . . .	43
<b>7 Liens avec les dispositifs nationaux</b>	<b>47</b>
7.1 Vers une amélioration de Vigicrues Flash . . . . .	47
7.2 Examen des performances de la méthode SHYREG sur les Alpes du Nord . . . . .	49
<b>Bibliographie</b>	<b>58</b>

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Le projet HYDRODEMO

Le projet HYDRODEMO a pour objectif de mieux connaître les aléas et risques liés aux crues torrentielles dans les Alpes du Nord pour pouvoir *in fine* mieux s'en prémunir. L'occurrence et la concomitance d'épisodes pluvieux intenses sur des sols plus ou moins pré-saturés génèrent, dans les Alpes du Nord comme ailleurs, des crues des cours d'eau. Dans les zones montagneuses, le relief donne aux écoulements l'énergie pour éroder, transporter et déposer des matériaux sédimentaires. Ces processus aggravent régulièrement les dommages associés aux inondations. HYDRODEMO vise à combler un manque critique de connaissance sur ce type d'aléa, tout d'abord en caractérisant l'hydrologie et le transport solide de bassins versants instrumentés, puis en définissant une méthodologie de transposition aux autres bassins versants des Alpes du Nord. Le projet est organisé en cinq actions (Fig. 1.1).

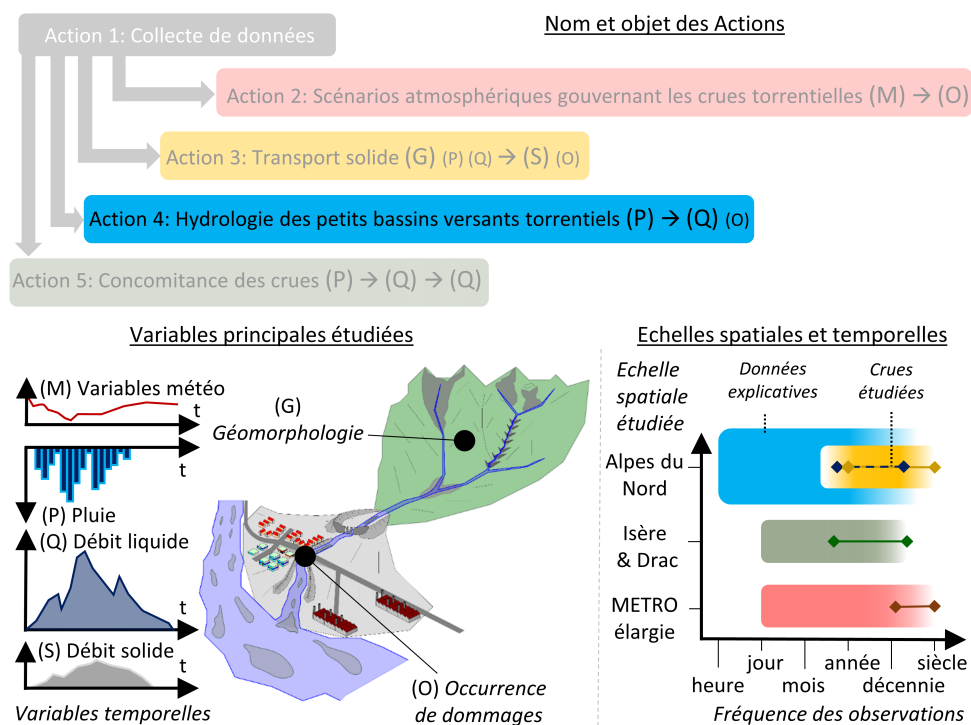


FIGURE 1.1 – Organisation générale des actions du projet HYDRODEMO.

- **L’Action 1** vise à faire la synthèse des données mobilisées par l’ensemble des autres Actions ;
- **L’Action 2** vise à caractériser les scénarios atmosphériques gouvernant les crues torrentielles qui ont sévi historiquement dans la région Grenobloise ;
- **L’Action 3** vise à caractériser l’activité de transport solide associée aux crues torrentielles via les données de curage des plages de dépôt équipant les torrents des Alpes du Nord ;
- **L’Action 4**, objet du présent rapport, vise à développer un cadre de modélisation hydrologique pour les bassins versants torrentiels des Alpes du Nord ;
- **L’Action 5**, utilise des outils de modélisation hydrologique pour l’analyse des concomitances de crues torrentielles sur les bassins versants et sous-bassins versants de l’Isère et du Drac.

Ces actions contribuent au développement de nouvelles connaissances scientifiques qui permettront à l’avenir de mieux comprendre les phénomènes associés aux aléas torrentiels, de mieux les prévenir et d’améliorer l’avertissement des populations.

## 1.2 Pourquoi l’Action 4 : Développer un cadre de modélisation hydrologique pour les petits bassins versants torrentiels ?

Le manque criant d’observations hydrométéorologiques dans les Alpes du Nord et en particulier dans la région grenobloise (Richard et Obled, 2001), que ce soit en terme de forçage météorologique ou hydrologique, limite fortement les applications de modèles hydrologiques dans cette région. Aucune application dans les Alpes du Nord n’est par exemple effectuée dans la thèse de Benjamin Graff (Graff, 2004). Les applications dans cette région sont donc lacunaires et limitées à peu de bassins versants (Obled *et al.*, 2005). Cette action vise donc à exploiter les avancées scientifiques obtenues sur la caractérisation des forçages météorologiques, notamment à partir des réanalyses SPAZM (Gottardi *et al.*, 2012) et COMEPHORE (Champeaux *et al.*, 2009) disponibles à une résolution spatiale fine (1 km x 1 km) adaptée au contexte torrentiel, ainsi que les évolutions des modèles hydrologiques disponibles pour le territoire d’étude (modules de représentation des stocks de neige et de glace, modélisation continue, ...), ces évolutions étant soit pré-existantes au projet, soit apportées dans le cadre du projet HYDRODEMO.

Ces avancées, tant sur les connaissances météorologiques que sur la modélisation hydrologique, devraient permettre de mieux caractériser et reproduire le fonctionnement des petits bassins versants instrumentés de montagne.

# Chapitre 2

## Méthodes et données

### 2.1 Méthodologie

Afin de caractériser le fonctionnement des bassins de montagne, nous avons utilisé deux modèles hydrologiques disponibles sur la zone alpine : le modèle semi-distribué MORDOR-SD et le modèle distribué SMASH, respectivement présentés au chapitre 4 et au chapitre 5. Les deux étapes principales du travail réalisé sont :

- la mise en œuvre des modèles, après calage de leurs paramètres, sur les échantillons de bassins versants instrumentés présentés ci-dessous (voir paragraphe 2.2.2). Cette mise en œuvre a mis en évidence des besoins d'adaptation des modèles à la zone d'étude : réduction du nombre de paramètres pour MORDOR-SD, amélioration de la structure du modèle pour SMASH ;
- la régionalisation des paramètres dans l'objectif de permettre la transposition des modèles sur les bassins versants non jaugés.

Les performances des modèles sont évaluées à chacune de ces étapes selon des critères d'écart entre débits observés et débits modélisés et selon des statistiques de dépassements de seuils (cf. paragraphe 3.2). La possibilité de mise en œuvre des modèles sur des bassins versants non jaugés sera conditionnée à leurs performances en contexte considéré comme non jaugé (voir paragraphes 6.3 et 6.4).

### 2.2 Rappel sur les données

Dans cette partie, nous décrivons succinctement les données utilisées pour le calage et la mise en œuvre des modèles hydrologiques. Une présentation détaillée de ces données est disponible dans le rapport dédié à l'action 1 du projet et intitulé "État des lieux et recueil de l'information disponible concernant l'aléa torrentiel" (Mas *et al.*, 2022).

#### 2.2.1 Forçages climatiques

Les données météorologiques utilisées (précipitation et température) sont des données raster, c'est-à-dire sous forme de grille, à la résolution spatiale de 1 km<sup>2</sup> et à la résolution temporelle de 1 heure.

## 2.2.2 Données hydrologiques

Les séries de débits observés proviennent en majorité de la Banque Hydro (<http://hydro.eaufrance.fr/>) ainsi que de quelques stations gérées par EDF. Pour les stations de la Banque Hydro, les débits au pas de temps horaire ont été construits par interpolation des débits à pas de temps variable extraits de la Banque Hydro.

L'utilisation de séries au pas de temps horaire peut constituer une limite pour l'étude des phénomènes torrentiels sur les petits bassins versants (moins de 20 km<sup>2</sup>) dont les temps de réponse sont de l'ordre de l'heure (Marchi *et al.*, 2010). Cette résolution temporelle est cependant la plus fine pour laquelle des longues chroniques de forçages météorologiques sont disponibles à une résolution spatiale adaptée (au km<sup>2</sup>), l'utilisation d'un modèle hydrologique requérant par ailleurs des séries de forçage suffisamment longues pour sa calibration.

## 2.2.3 Échantillons de bassins versants

Plusieurs définitions de la zone "Alpes du Nord" sont possibles (Meyzenq, 1984). On a choisi dans un premier temps de considérer l'ensemble des bassins versants situés dans les départements de la Drôme, l'Isère, la Savoie, la Haute-Savoie et les Hautes-Alpes. Les bassins versants ont été sélectionnés dans ce domaine spatial selon des critères de taille (surface inférieure à 300 km<sup>2</sup>) et de qualité des séries de débits mesurés. En particulier, les séries de débits trop courtes (moins de 5 ans cumulés) n'ont pas été conservées. On a de plus éliminé les bassins versants pour lesquels la qualité des mesures en hautes eaux était douteuse. Les problèmes les plus couramment rencontrés pour les bassins issus de la Banque Hydro sont notamment des mesures plafonnantes lors des crues, des durées entre deux mesures très importantes lors de crues, et des problèmes de dates (voir illustrations dans Evin et Piton, 2020).

Dans les départements de l'Isère, la Savoie et la Haute-Savoie, tous les bassins versants répondant à ces critères ont été conservés. Dans le département des Hautes-Alpes, les bassins versants appartenant au bassin du Drac ont été conservés, ainsi que quelques bassins situés aux marges des massifs classiquement partagés entre Alpes du Nord et Alpes du Sud (Dévoluy, Ecrins, Cerces). Dans le département de la Drôme, les bassins versants conservés sont ceux des cours d'eau issus des contreforts ouest et sud du massif du Vercors. L'échantillon final est composé de 79 bassins versants dont la localisation est présentée sur la figure 2.1. Parmi eux, 56 bassins disposant de suffisamment de données sur la période 1997-2017 ont été utilisés pour l'expérience de calage-validation. Un bassin versant, Le Sonnant à Gières, n'a pas pu être exploité avec SMASH (le contour du bassin ne respectant pas les contraintes numériques de la plateforme SMASH). Les intercomparaisons entre MORDOR-SD et SMASH sont donc effectuées sans ce bassin, avec un jeu de 55 bassins versants.

Les distributions d'un certain nombre de descripteurs physiques des bassins sont illustrées sur la figure 2.2. L'échantillon est majoritairement composé de petits bassins versants dont la surface ne dépasse pas 200 km<sup>2</sup> pour 80% d'entre eux. Pour 75% des bassins, l'altitude médiane est supérieure à 580 m et la plage d'altitude (différence entre les altitudes maximum et minimum) dépasse 1000 m. Compte-tenu du climat montagnard des Alpes du Nord, la plupart des bassins seront donc au moins partiellement concernés par des précipitations solides de manière régulière. La compacité des bassins est variable avec des coefficients de Gravelius majoritairement compris entre 1.2 (bassins compacts) et 1.5 (bassins allongés).

La mise au point et la validation de la méthode de régionalisation est conduite sur l'échantillon de bassins versants jaugés qu'on divise en deux groupes homogènes du point de vue de quelques descripteurs de bassin (voir ci-dessous). Le groupe de calage est utilisé pour définir la méthode de régionalisation.

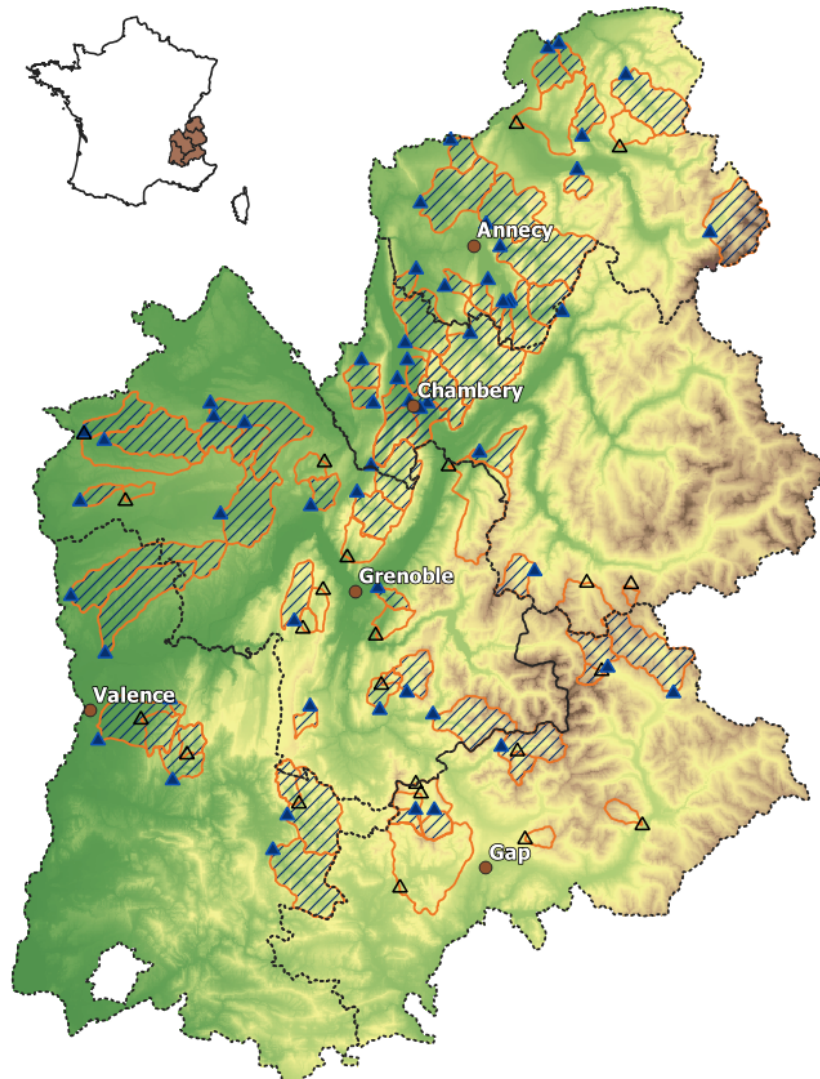


FIGURE 2.1 – Contours des 79 bassins versants jaugés et localisation de leurs exutoires. Les 56 bassins hachurés et dont l'exutoire est représenté par un triangle plein sont ceux utilisés pour l'expérience de calage-validation.

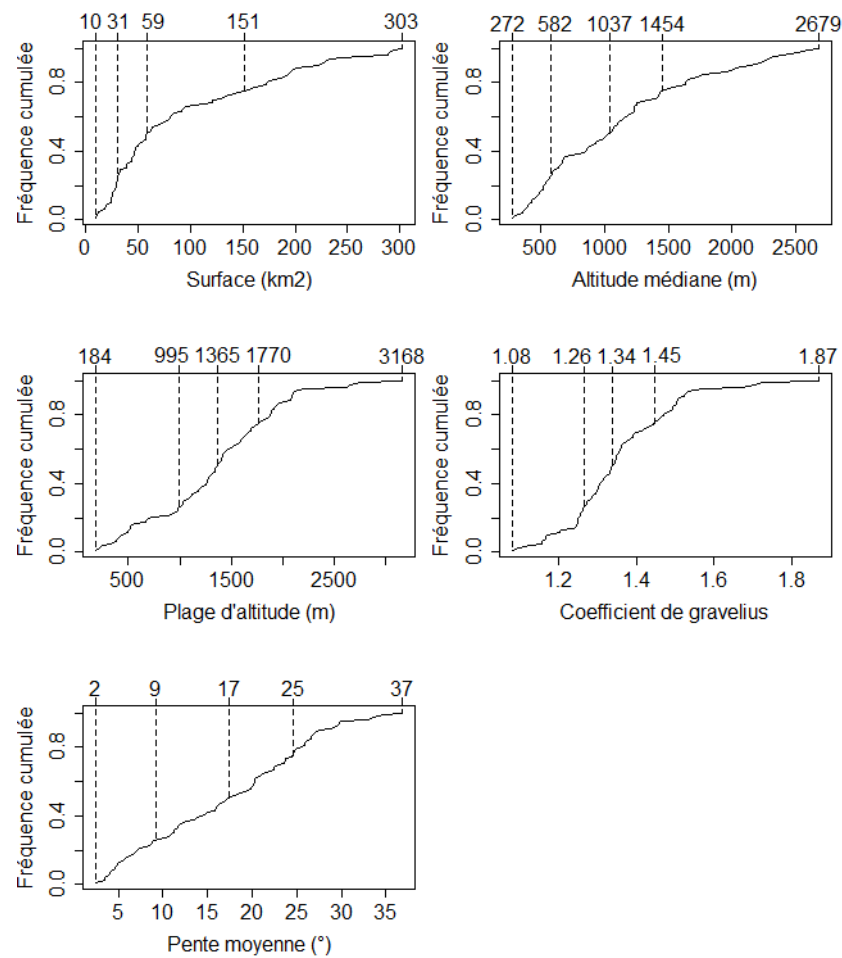


FIGURE 2.2 – Distribution de la surface, de l'altitude médiane, de la plage d'altitude, du coefficient de Gravelius et de la pente moyenne des 79 bassins versants jaugés. Les valeurs minimale, médiane et maximale ainsi que les quantiles à 25% et 75% sont précisés.

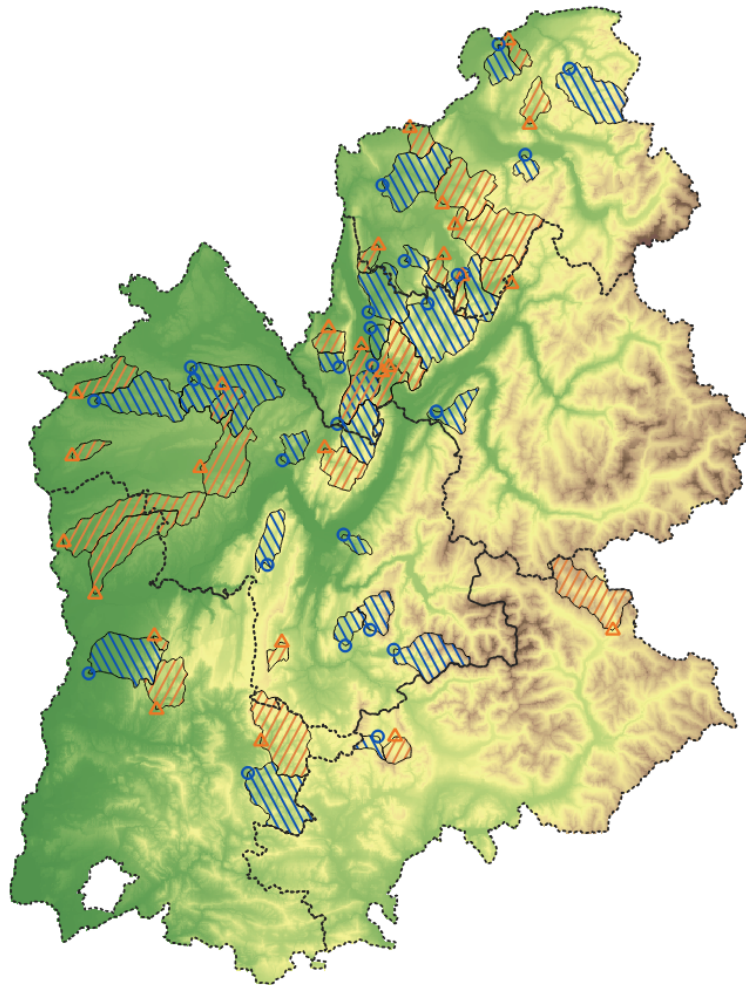


FIGURE 2.3 – Contours et exutoires des 52 bassins versants utilisés pour les expériences de régionalisation. Les deux groupes de bassins sont identifiés par des hachures rouges et bleues, respectivement.

sation à partir de paramètres calés. Le groupe de validation est utilisé pour valider cette méthode en évaluant les performances du modèle avec les paramètres régionalisés. Les rôles des deux groupes sont ensuite inversés pour évaluer la robustesse de l'approche. Afin de travailler sur une période temporelle homogène et d'assurer la robustesse des calages, seuls les bassins disposant d'au moins 10 ans de données de débits observés sur la période 1997-2017 seront utilisés. De plus, on exclut de l'échantillon les bassins contenant des zones glaciaires afin de limiter les interactions entre les modules neige et glace.

On retient au final deux groupes de 26 bassins versants dont la répartition spatiale sur la zone d'étude est illustrée sur la figure 2.3. Les bassins ont été distribués dans les groupes de sorte à obtenir des distributions de surface, d'altitude moyenne et de latitude similaires entre eux.

Ce rapport présente les développements méthodologiques réalisés dans le cadre de la mise en œuvre des modèles hydrologiques MORDOR-SD et SMASH sur ces bassins jaugés. Il présente également les différents développements menés en contexte non jaugé pour la régionalisation des paramètres de ces modèles. Les résultats détaillés obtenus sur des bassins non jaugés avec le modèle MORDOR-SD sont disponibles dans un rapport dédié (Mas et Evin, 2021).





## Chapitre 3

# Évaluation des performances

Les deux modèles hydrologiques MORDOR-SD et SMASH ont été mis en œuvre sur les bassins versants présentés au paragraphe 2.2.3 suivant différentes expériences numériques présentées dans les paragraphes suivants. Ce chapitre présente les critères ayant permis d'évaluer les performances des modèles lors de ces expériences.

### 3.1 Sensibilité à la méthode d'estimation des paramètres

- Différentes expériences d'ajustement des paramètres des modèles hydrologiques ont été menées :
- expérience de calage-validation pour évaluer, sur une période n'ayant pas servi au calage, les performances du modèle calé,
  - expérience de calage sur toute la période couverte par les entrées de pluie pour disposer de paramètres les plus robustes possibles,
  - expérience d'application en contexte non jaugé avec plusieurs stratégies de régionalisation des paramètres.

#### 3.1.1 Calage - validation

L'expérience de calage-validation a été effectuée pour évaluer les performances des différentes structures de modélisation testées pour MORDOR-SD (voir Mas et Evin, 2021, section 4.2) et SMASH (voir section 5.3). Cette expérience a été appliquée sur la période 1997-2017 selon le même protocole de calage-validation croisée qui permet d'évaluer à la fois :

- les performances globales du modèle, que l'on évalue sur la période de validation, c'est-à-dire la période qui n'a pas servi au calage,
- la robustesse des jeux de paramètres, le cas idéal étant un jeu de paramètres relativement stable d'une période à l'autre, peu sensible à l'échantillon de données de calage et a priori plus apte à être utilisé sur une autre période.

La période 1997-2017 a été divisée en deux sous-périodes,  $p1$  pour les années 1997 à 2007 et  $p2$  pour les années 2007 à 2017 (figure 3.1). L'expérience de calage-validation a été menée de manière croisée impliquant que pour chaque sous-période, un calage et une validation ont été effectués. Pour chaque sous-période, une année d'initialisation, dite de chauffe, est conservée afin de palier les erreurs dues aux conditions initiales du modèle. Ces erreurs dues aux conditions initiales sont en effet considérées comme résorbées au bout d'une année de fonctionnement du modèle.

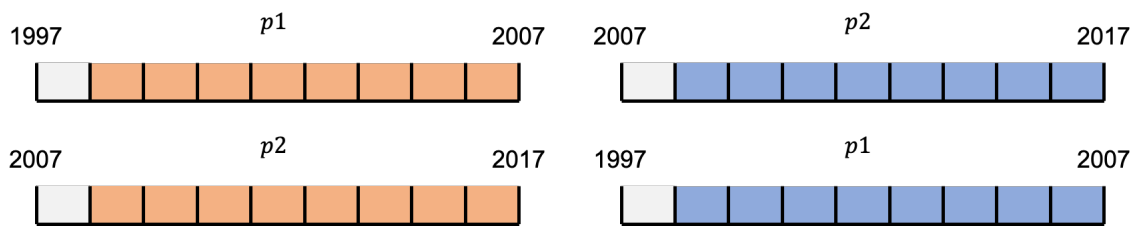


FIGURE 3.1 – Représentation de l'expérience calage-validation. Années d'initialisation en blanc, années de calage en orange et années de validation en bleu.

### 3.1.2 Calage période complète

L'expérience de calage sur la période complète,  $p3 = p1 + p2$ , a été effectuée en calibrant le modèle sur la totalité de la disponibilité des forçages COMEPHORE (1997-2017). Ce calage a permis d'obtenir une paramétrisation plus robuste du modèle ainsi que, après régionalisation, les débits simulés nécessaires pour le calcul des quantiles présentés au paragraphe 6.4. Les performances globales de chaque sous-période ont été évaluées sur le critère de Nash-Sutcliffe  $J_{nash}$  (Equation 3.2) et le critère KGE  $J_{kge}$  (Equation 3.3). Concernant les avertissements de crue, ils ont été évalués à travers des critères de contingences définis à la section 3.2.

### 3.1.3 Contexte non jaugé

En contexte non jaugé, les 3 stratégies suivantes de régionalisation des paramètres ont été testées pour les deux modèles MORDOR-SD et SMASH avec les précipitations COMEPHORE :

1. **l'utilisation des valeurs médianes des paramètres** : la mise en œuvre du modèle sur un bassin non jaugé est effectuée en fixant chaque paramètre à sa valeur médiane issue du calage mené sur la période complète sur le sous-échantillon de bassins versants de calibration ; cette stratégie de régionalisation par transfert des paramètres est dénommée "Transfert uniforme médian" ;
2. **l'utilisation des valeurs optimales des paramètres** : la mise en œuvre du modèle sur un bassin non jaugé est effectuée en prenant le jeu de paramètres de bassin qui donne la meilleure performance moyenne sur le sous-échantillon de bassins versants de calibration. Les jeux de paramètres testés sont issus du calage période complète ; cette stratégie de régionalisation par transfert des paramètres est dénommée "Transfert uniforme optimal" ;
3. **la similarité entre bassins** : la mise en œuvre du modèle sur un bassin non jaugé est effectuée en prenant le jeu de paramètre du bassin jaugé le plus similaire. L'indice de similarité  $\Phi_j$  entre un bassin donneur  $j$  et un bassin cible  $i$  est calculé selon l'équation suivante :

$$\Phi_j = \frac{|S_c^j - S_v^i|}{\max(|S_c - S_v^i|)} + \frac{|Z_c^j - Z_v^i|}{\max(|Z_c - Z_v^i|)} + \frac{D_c^{j,i}}{\max(D_c^i)}, \quad (3.1)$$

avec  $S$  la surface des bassin,  $Z$  l'altitude médiane et  $D$  la distance entre les centres des bassins. Le bassin de calage dont les caractéristiques minimisent l'indice est sélectionné comme donneur.

On rappelle que pour cette expérience en contexte non jaugé, l'échantillon de bassins versants a été découpé en deux sous-groupes, un groupe de calage (jaugé) et un groupe de validation (pseudo non jaugé), dont les rôles ont été inversés pour évaluer la robustesse de l'approche.

## 3.2 Critères de performances

Pour chacune des expériences numériques présentées, les performances globales des modèles ont été évaluées à l'aide du critère de Nash-Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 1970)  $J_{nash}$  (Equation 3.2) et du critère KGE (Gupta *et al.*, 2009a)  $J_{kge}$  (Equation 3.3) dont les valeurs optimales sont 1 :

$$J_{nash} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t))^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}})^2}, \quad (3.2)$$

avec  $n$  le nombre de pas de temps,  $Q_{obs}$  (resp.  $Q_{sim}$ ) le débit observé (resp. simulé) au pas de temps  $t$  et  $\overline{Q_{obs}}$  le débit moyen observé sur la période de calcul ;

$$J_{kge} = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2}, \quad (3.3)$$

avec  $r$  le coefficient de corrélation de Pearson,  $\mu$  la moyenne et  $\sigma$  l'écart type.

Les modèles ont également été évalués en termes de performances sur l'avertissement de crues, estimées par le biais de critères de contingences calculés à partir des dépassements de valeurs seuils de crue. L'extraction des événements de crue a été réalisée par une méthode d'approche sup-seuil (Mathys, 2010) sur la période complète 1997-2017 pour les débits observés et simulés. Les quantiles pour les périodes de retour 2, 5, 10 et 20 ans sont ensuite obtenus par ajustement d'une loi statistique adaptée aux valeurs extrêmes, la loi de Pareto généralisée (GPD). Pour une période de retour fixée, la comparaison des dépassements de seuil des séries de débits simulés et observés permet d'identifier trois métriques suivant la situation rencontrée figure 3.2 :

- alerte correcte et anticipée (C) : les dépassements de seuil observé et simulé concordent. Une anticipation de 12h maximum du dépassement de seuil simulé par rapport au dépassement de seuil observé est acceptée,
- alerte manquée (M) : seul un dépassement de seuil observé est identifié,
- fausse alerte (FA) : seul un dépassement de seuil simulé est identifié.

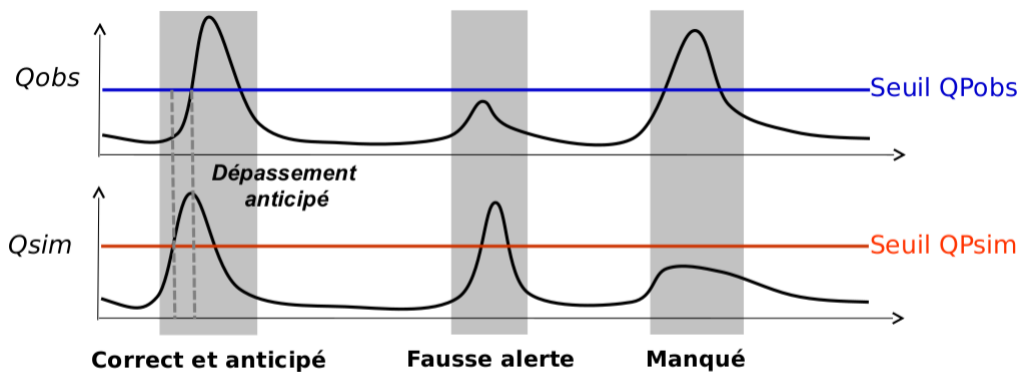


FIGURE 3.2 – Illustration des trois métriques identifiables lors de dépassements de seuil.

Ces métriques sont ensuite utilisées pour calculer les critères de contingences suivants :

- le critère POD (Donaldson *et al.*, 1975) *Probability Of Detection*, mesure la proportion de dépassements correctement prévus (C) parmi tous les dépassements observés (C + M). Le critère varie entre 0 et 1, avec un score optimal égal à 1 (toutes les alertes observées sont détectées) ;

$$POD = \frac{C}{C + M}.$$

- le critère SR (Schaefer, 1975) *Success Ratio*, mesure la fiabilité des dépassements simulés, définie par la proportion de dépassements correctement prévus (C) parmi tous les dépassements simulés (C + FA). Le score varie entre 0 et 1, avec un score optimal égal à 1 indiquant l'absence de fausse alerte ;

$$SR = \frac{C}{C + FA}.$$

- le critère CSI (Donaldson *et al.*, 1975) *Critical Success Index* (CSI), qui permet de considérer les alertes manquées et les fausses alertes sans différencier ces deux types d'erreur. Il se définit par le rapport entre le nombre de dépassements correctement prévus (C) et tous les dépassements observés et/ou simulés (C + M + FA). Le score varie entre 0 et 1, avec un score optimal égal à 1.

$$CSI = \frac{C}{C + M + FA}.$$

Ces scores sont calculables pour chaque bassin de manière indépendante mais pour une question de synthèse et de pertinence des résultats, les métriques de chaque bassin (C, M et FA) sont sommées pour former des scores de contingences globaux de l'échantillon de 55 bassins versants.

# Chapitre 4

## MORDOR-SD

### 4.1 Historique et description du modèle

Le modèle MORDOR (Garçon, 1996) est développé et utilisé par EDF depuis plus de 30 ans pour une large gamme d'applications : gestion en temps réel, prévision des apports, études prospectives. Les données nécessaires à son fonctionnement sont la température moyenne sur le bassin et le cumul total de précipitation sur le bassin pour chaque pas de temps. Les dernières évolutions du modèle ont introduit une spatialisation par bandes d'altitude des forçages et des processus (Garavaglia *et al.*, 2015). Cette spatialisation permet de reproduire les gradients de température et de précipitation et améliore la représentation de l'étagement des processus hydrologiques, en particulier l'accumulation et la fonte de neige ou de glace. Le modèle MORDOR-SD, issu de ces travaux, est un modèle semi-distribué conceptuel à réservoirs dont la structure est présentée sur la figure 4.1.

Sur chaque bande d'altitude, un modèle de production à trois réservoirs partitionne le volume d'eau évaporé ou transpiré, le volume d'eau ruisselé en surface et sub-surface et le volume d'eau infiltré, ce dernier étant dirigé vers un réservoir de nappe commun à toutes les bandes d'altitude. Une fonction de transfert globale assure ensuite la représentation du routage des contributions de toutes les bandes d'altitudes et du réservoir de nappe à l'exutoire. Pour plus de détails sur le fonctionnement du modèle, se référer à Garavaglia *et al.* (2017).

Les processus représentés par MORDOR-SD sont contrôlés par 24 paramètres qui sont décrits dans la figure 4.2. Ces paramètres peuvent être prescrits ou ajustés par calage à partir des mesures météorologiques et hydrologiques (voir ci-dessous).

### 4.2 Choix des paramètres calés

Comme mentionné précédemment, MORDOR-SD dispose au maximum de 24 paramètres ajustables. Des travaux ont été effectués par EDF (Garavaglia et Le Lay, 2017) pour prescrire un certain nombre de ces paramètres et mieux contraindre les autres afin de limiter les problèmes d'équifinalité (ensemble de paramètres conduisant à la même réponse hydrologique) et d'interdépendance (paramètres fortement corrélés lors de la minimisation de la fonction objective). Dans le cadre d'HYDRO-DEMO, le nombre de paramètres calés a été réduit à 13 au minimum. Deux paramètres supplémentaires sont nécessaires pour les bassins possédant une portion de surface englacée. Le choix de calage ou de prescription de chaque paramètre est mentionné dans la figure 4.2.

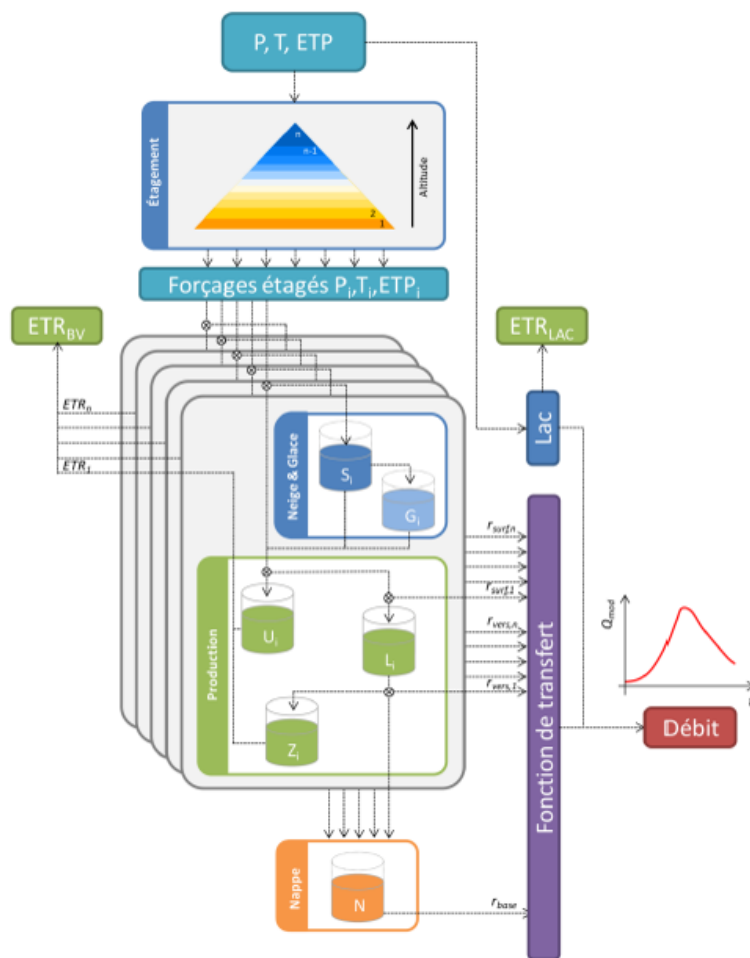


Figure 1 : Schéma fonctionnel de MORDOR SD.

FIGURE 4.1 – Structure du modèle hydrologique MORDOR-SD. Tiré de Garavaglia *et al.* (2017).

Module	Paramètres	Description [unité]	Calage HYDRODEMO	Valeur ou plage de recherche
Forçages	cp	Coefficient correctif des précipitations [-]	Oui	[0,6 , 2]
	csbv	Coefficient correctif de la superficie du bassin versant [-]	Indépendant	[0,1 , 2]
	cetp	Coefficient correctif de l'ETP [-]	Non	1
	gtz	Gradient altitudinal de température [°C/100m]	Oui	[-0,8 , -0,4]
	gpz	Gradient altitudinal de précipitation [%/km]	Oui	[0,1 , 0,7]
Production	kmin	Coefficient cultural minimal [-]	Non	1
	umax	Capacité à un pas de temps du réservoir superficiel U [mm]	Oui	[30 , 300]
	lmax	Capacité à un pas de temps du réservoir intermédiaire L [mm]	Oui	[30 , 300]
	zmax	Capacité à un pas de temps du réservoir évaporant Z [mm]	Non	umax
	evl	Exposant de la vidange du réservoir intermédiaire L [-]	Oui	[1,5 , 4]
	kr	Clé de répartition entre les écoulements retardés et lents [-]	Oui	[0,1 , 0,9]
Transfert	cel	Célérité de l'onde de propagation [km/h]	Oui	[0,1 , 5]
	dif	Diffusion de l'onde de propagation [km²/h]	Oui	[0,1 , 5]
Ecoulements lents	lkn	Logarithme du coefficient de tarissement du réservoir profond N [mm/h]	Oui	[-6 , -1]
	evn	Exposant de la vidange du réservoir profond N [-]	Non	3
Neige	kf	Part fixe du coefficient de fonte superficielle [mm/°C]	Oui	[0 , 5]
	kfp	Part variable du coefficient de fonte superficielle [mm/°C]	Non	0,5
	eft	Correction additive de la température de fonte [°C]	Oui	[-3 , 3]
	efp	Correction additive de la température de partition pluie/neige [°C]	Oui	[-3 , 3]
	lts	Lissage exponentiel de la température du stock de neige [-]	Non	0,96
	gm	Lame de fonte basale [mm]	Non	0,6
Glace	kg	Part fixe du coefficient de fonte glaciaire [mm/°C]	Oui	[0 , 8]
	kgp	Part variable du coefficient de fonte glaciaire [mm/°C]	Non	0
	efg	Correction additive de la température de fonte glaciaire [°C]	Oui	[-3 , 3]

FIGURE 4.2 – Paramètres du modèle hydrologique MORDOR-SD. Adapté de Garavaglia et Le Lay (2017).

Le paramètre *cetp* est fixé à 1 car on considère que l'erreur sur l'évapotranspiration est minime par rapport aux incertitudes sur les précipitations, qui sont corrigées avec le paramètre *cp*. Le paramètre *kmin* est mal contraint par le calage sur des données de débit uniquement et présente une faible sensibilité, il est donc fixé à sa valeur par défaut. Les paramètres *umax* et *zmax* sont en interaction et ont une sensibilité moyenne, la préconisation est de ne caler qu'un seul des deux et de considérer que  $umax = zmax$ . Le paramètre *evn* est fixé pour limiter les interactions avec *lkn*. Le paramètre *kfp* est en interaction forte avec les autres paramètres du module neige mais présente une sensibilité moindre, il est donc fixé. Il en va de même pour le paramètre *kgp* du module glace. Les paramètres *lts* et *gm* ont une sensibilité très faible et sont fixés à des valeurs classiquement admises dans la littérature.

Les paramètres *cp* et *csbv* permettent de corriger le bilan hydrologique du bassin versant, *cp* pondérant la lame d'eau précipitée et *csbv* permettant d'ajuster la surface du bassin versant et ainsi de moduler la valeur des volumes écoulés exprimés en lame d'eau. Il peut être utilisé en particulier lorsque l'impluvium réel (surface du bassin qui contribue à l'écoulement à l'exutoire considéré) est différent du bassin versant topographique, par exemple dans le cas des bassins karstiques. Ces paramètres étant critiques pour la performance de MORDOR-SD, plusieurs expériences d'estimation de ces deux paramètres ont été effectuées en contexte jaugé et non-jaugé (Mas et Evin, 2021). Les deux prochaines sections décrivent comment ces paramètres ont été estimés pour obtenir les résultats du présent rapport.

### 4.3 Estimation des paramètres en contexte jaugé

Le paramètre *csbv* fait l'objet d'un calage indépendant décrit dans l'annexe A du rapport Mas et Evin (2021). Pour les bassins versants sans contribution glaciaire, 13 paramètres sont estimés en maximisant une fonction objective de calage multicritère, c'est-à-dire visant à maximiser la performance du



modèle pour plusieurs signatures hydrologiques des bassins versants. Les préconisations d'EDF nous ont amenés à sélectionner trois de ces signatures pertinentes par rapport aux objectifs du projet. La première est la série de débit horaire identifiée par l'indice  $Q$ . La seconde est la série des moyennes inter-annuelles, identifiée par l'indice  $reg$ , utilisée pour évaluer la capacité du modèle à reproduire le régime hydrologique du bassin versant. La troisième est la courbe des débits classés issue d'une recombinaison des débits classés mensuels pondérés par le module mensuel, identifiée par l'indice  $Qcla$ , qui permet d'évaluer les performances du modèle en terme de reproduction de la distribution des débits. Pour chacune de ces signatures hydrologiques, l'adéquation entre observations et simulations est évaluée à l'aide du critère KGE (Gupta *et al.*, 2009b) dont la formulation est développée dans l'équation 4.1.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2}, \quad (4.1)$$

avec  $r$  le coefficient de corrélation entre la variable observée et la variable simulée,  $\mu$  la moyenne et  $\sigma$  l'écart-type.

Cinq bassins de l'échantillon complet de bassins jaugés sont concernés par la présence de glaciers pour lesquels deux paramètres additionnels ( $kg$  et  $efg$ ) doivent être estimés. La surface relative englacée de ces bassins doit par ailleurs être fournie. Ces surfaces ont été estimées manuellement à partir des images aériennes et des cartes topographiques du portail IGN.

## 4.4 Réduction de la dimension en contexte non-jaugé

### 4.4.1 Paramètres fixés ou déterminés à partir de descripteurs de bassins

On peut distinguer deux approches principales dans les méthodes de régionalisation (He *et al.*, 2011). Les approches par régression cherchent à établir des relations entre les paramètres du modèle et des descripteurs physiques des bassins (Neri *et al.*, 2020). Pour que cette approche fonctionne, il faut que, pour chaque paramètre, les différences qui existent entre bassins soient uniquement liées à des différences de fonctionnement hydrologique. Or, les problèmes d'équifinalité rendent cet objectif difficile à atteindre (Oudin *et al.*, 2008). Les approches par bassin voisin ou bassin similaire consistent à transférer au bassin non jaugé les paramètres d'un (ou plusieurs) bassin(s) jaugé(s) sélectionné(s) selon diverses métriques (Yang *et al.*, 2018). Plus on utilise de paramètres calés sur d'autres bassins, moins on tient compte des spécificités du bassin non jaugé et plus on risque de s'éloigner d'une représentation adéquate de son fonctionnement hydrologique.

Pour ces deux approches, par régression ou par bassin voisin, la réduction du nombre de paramètres calés est un levier intéressant à utiliser car elle permet de limiter les interactions entre paramètres lors du calage et d'augmenter le contenu informatif du jeu de paramètres en exploitant des descripteurs propres à chaque bassin. Cette réduction du nombre de paramètres se fait cependant au détriment des performances du modèle.

Le nombre de paramètres calés a été réduit de 13 à 6. En premier lieu, on a fixé les paramètres peu sensibles à des valeurs classiquement admises dans la littérature ou de sorte qu'ils n'aient pas d'effet. C'est ici le cas du paramètre  $eft$ . Ensuite, les paramètres  $gpz$ ,  $gtz$ ,  $cel$ ,  $dif$  et  $kr$  ont été déterminés à partir de descripteurs de bassins en utilisant des relations mises au point par EDF (Garavaglia *et al.*, 2017; Rouhier, 2018). Des détails sont donnés ci-après pour chaque paramètre.

**gtz et gpz :** Les gradients de température et de précipitation peuvent être calculés pour tout bassin en utilisant les données de forçages météorologiques. Pour chaque pixel appartenant au bassin, on calcule le cumul annuel moyen de précipitation ainsi que la température annuelle moyenne. On ajuste ensuite une relation linéaire entre l'altitude et chacun des forçages qui permet d'obtenir les gradients.

**cel et dif :** Les paramètres de la fonction de transfert de MORDOR sont estimés à partir d'une fonction de transfert dite géomorphologique. Cette dernière est calculée uniquement à partir d'un modèle numérique de terrain par une méthode mise au point par EDF. On peut donc estimer les paramètres *cel* et *dif* sur n'importe quel bassin versant dont on dispose du contour.

**kr :** Le paramètre *kr* est estimé à partir de l'indice IDPR (Indice de Développement et de Persistance des Réseaux) moyen du bassin versant (Mardhel, 2006). Cet indice traduit le caractère plus ou moins infiltrant d'un sol. Il a été montré qu'il peut être utilisé comme estimateur direct du paramètre *kr* sans dégrader les performances du modèle sur plusieurs bassins versants français (Rouhier, 2018).

**eft :** Le paramètre *eft* est en interaction avec le paramètre *efp*, et de manière générale avec les paramètres du module neige. La correction de la température via *eft* permet d'ajuster la temporalité et l'intensité de la fonte du manteau neigeux. Le retour d'expérience d'EDF montre que sauf difficulté particulière sur le phasage du régime, fixer le paramètre *eft* à 0 n'induit pas une baisse de performance systématique et significative, les autres paramètres du module neige disposant toujours d'assez de degrés de liberté pour simuler correctement l'évolution du stock de neige. Les résultats sur bassins jaugés indiquent par ailleurs une mauvaise identifiabilité du paramètre et motive sa prescription afin de limiter les interactions entre les paramètres (Mas et Evin, 2021).

**csbv :** En contexte non-jaugé, nous supposons ici que nous ne pouvons pas obtenir le coefficient correctif de la superficie du bassin versant et il est fixé à 1. Le bilan hydrologique du modèle peut donc seulement être amélioré avec le paramètre *cp*.

#### 4.4.2 Régionalisation des paramètres restants

Les sept paramètres restants à régionaliser sont :

- les capacités  $l_{max}$  et  $zu_{max}$  des réservoirs  $L$  et  $Z + U$ ,
- les exposants de vidange  $evl$  et  $lkn$  des réservoirs  $L$  et  $N$ ,
- le coefficient de fonte  $kf$  et la correction additive de la température de partition pluie/neige  $efp$ .
- le coefficient correctif des précipitations  $cp$ .

Dans Mas et Evin (2021), les expériences de régionalisation avaient été effectuées avec des estimations préalables de *csbv* et *cp*. Nous supposons dans le présent rapport que ces estimations ne sont pas disponibles. Les performances obtenues pourront ainsi être comparées aux résultats obtenus avec SMASH.



# Chapitre 5

## SMASH

### 5.1 Présentation du modèle

SMASH est une plateforme de modélisation hydrologique flexible, spatialement distribuée, capable d’opérer à haute résolution spatiale et temporelle. Elle est conçue pour simuler des hydrogrammes de débit sur l’ensemble des mailles constituant le domaine de calcul. Elle inclut également des fonctionnalités d’analyse de sensibilité des paramètres, des méthodes de calibration uniforme et spatialement distribuée des paramètres ainsi que des fonctionnalités d’assimilation de données (Jay-Allemand *et al.*, 2019), ces données pouvant être des données de débits.

SMASH est issu des travaux menés à INRAE-Aix dans le domaine de l’anticipation des crues en France (Javelle *et al.*, 2016) et pour la prévision des étiages (Folton et Arnaud, 2020), et tire parti des forçages météorologiques spatialement distribués et des observations hydrométriques. Le modèle est basé sur une représentation conceptuelle des processus hydrologiques dominants tout en visant à maintenir une relative parcimonie, c’est-à-dire un faible nombre de paramètres. Cette recherche d’un faible nombre de paramètres est guidée par deux principes : limiter la redondance entre paramètres et faciliter le travail de régionalisation des paramètres du modèle, cette régionalisation devant permettre la mise en œuvre du modèle sur des bassins versants non jaugés.

Soit  $\Omega$  un domaine spatial 2D (bassin versant) et  $t > 0$  le temps physique. Les champs de pluie, d’évapotranspiration et de température sont respectivement notés  $P$ ,  $E$  et  $T$ , ils sont considérés constants par pas de temps  $\Delta t$ . Le modèle hydrologique SMASH est un opérateur dynamique  $\mathcal{M}$  reliant les chroniques de champs de pluie  $P(x, t')$ , d’évapotranspiration  $E(x, t')$  et de température  $T(x, t')$  au débit  $Q(x, t)$  à l’instant  $t$  selon :

$$Q(x, t) = \mathcal{M} [P(x, t'), E(x, t'), T(x, t'), h(x, 0), \theta(x)] \quad \forall x \in \Omega, \quad (5.1)$$

avec  $h(x, 0)$  le vecteur d’états du modèle au démarrage de la simulation,  $\theta$  le vecteur de paramètres du modèle et  $t' = [0, t]$  l’intervalle de temps depuis le début de la simulation.

Le modèle mis en œuvre dans SMASH est inspiré de la famille des modèles GR (Perrin *et al.*, 2003) qui comprend plusieurs modèles globaux et semi-distribués qui ont été développés au cours des 30 dernières années à INRAE-Antony. SMASH est un modèle continu qui fait intervenir, sur chaque maille, différents processus hydrologiques au choix de l’utilisateur : accumulation et fonte de la neige<sup>1</sup>, interception de la canopée, production, transfert lent et rapide au sein de la maille et acheminement du ruissellement entre les mailles. Dans le cadre du projet HYDRODEMO, la cohérence avec les échelles

---

1. ces processus ont été développés et mis en œuvre au pas de temps horaire dans le cadre du projet HYDRODEMO.

spatio-temporelles des données climatiques fournies est assurée en fixant le pas de temps du modèle à 1h et sa résolution spatiale à 1 km<sup>2</sup>.

La Figure 5.1 représente schématiquement l'une des structures les plus simples du modèle, celle à trois paramètres, notée SMASH v0. Dans cette structure, sont associés, en chaque pixel  $x$ , un réservoir de production de capacité  $cp$  et un réservoir de transfert de capacité  $ctr$ . Au sein de chaque pixel, la neutralisation de la pluie par l'évapotranspiration potentielle permet d'estimer une pluie nette ( $P_n$ ) qui est répartie entre le réservoir de production et le réservoir de transfert. La proportion de pluie qui ruisselle ( $P_r$ ) est proportionnelle au carré du niveau  $hp$  du réservoir de production de capacité  $cp$ . Le transfert non linéaire de cette pluie  $P_r$ , au sein du pixel, est ensuite assuré par le réservoir de transfert en fonction de son niveau de remplissage  $htr$  et de sa capacité  $ctr$ . Au débit ainsi obtenu au sein du pixel  $x$ , sont ajoutés les débits issus des pixels amont au pas de temps précédent et transitant via le réservoir de routage du pixel, de capacité  $cr$ .

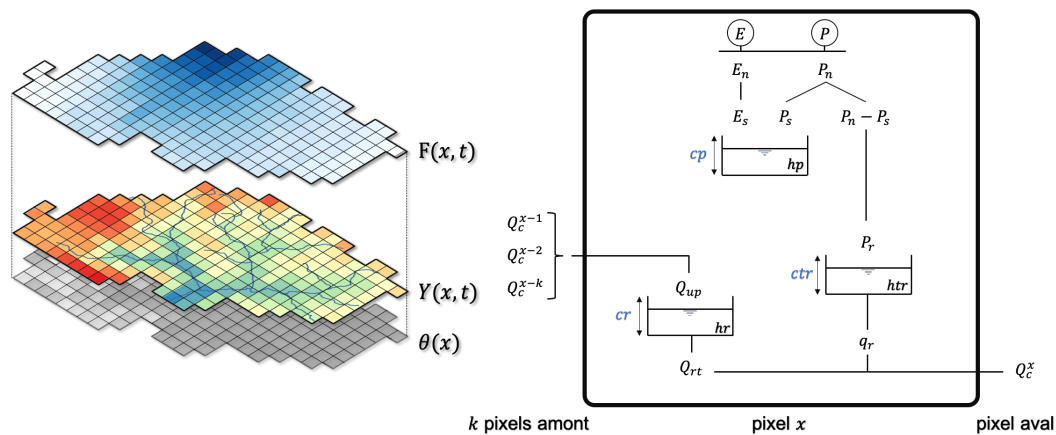


FIGURE 5.1 – Schéma du modèle à 3 paramètres SMASH v0. Avec  $F(x, t) = \{P(x, t), E(x, t), T(x, t)\}$ ,  $Y(x, t)$  : l'ensemble des sorties du modèle dont  $Q(x, t)$  et  $\theta(x)$ , les paramètres du modèle.

C'est cette structure simple qui sert de point de départ pour la présente étude. Une structure encore plus simple, sans routage, est opérée en temps réel par le Schapi dans le dispositif Vigicrues Flash. On notera la non prise en compte des précipitations solides et l'absence de modélisation de la neige dans ces deux structures simples. Cette non prise en compte de l'hydrologie nivale a conduit le Schapi à ne pas proposer le dispositif Vigicrues Flash, lors de son ouverture, pour les bassins versants de montagne<sup>2</sup> et à financer une action de recherche sur la modélisation de la neige dans SMASH. Ce travail de recherche, mené au pas de temps journalier pour des questions de disponibilité des données a montré les résultats suivants (Colleoni, 2020) :

- la prise en compte de la composante nivale améliore la modélisation en permettant une moindre surestimation des crues en période de chute de neige et une moindre sous-estimation des crues de fonte,
- l'amélioration de la structure du modèle avec l'introduction d'un deuxième réservoir de transfert permet une amélioration des performances générales du modèle.

2. souvent sujets par ailleurs à d'autres critères d'exclusion du service comme la présence de karst et de barrages, éléments non modélisés dans SMASH. Une avancée du modèle sur la prise en compte de la neige est nécessaire mais pas suffisante pour une extension large de la couverture de service.

## 5.2 Méthodologie de calibration du modèle

Soit  $J$  une fonction coût évaluant l'écart entre débits simulés et observés, le calage des paramètres d'un modèle consiste en la résolution du problème d'optimisation suivant :

$$\min_{\theta} J(\theta), \quad (5.2)$$

où la fonction de coût  $J$  dépend du vecteur  $\theta$  de paramètres recherchés au travers de la réponse du modèle hydrologique. Des contraintes de bornes sont appliquées aux paramètres recherchés. Dans le cadre du projet HYDRODEMO, deux méthodes de calage ont été appliquées :

- soit un calage uniforme qui attribue, pour un paramètre donné, la même valeur optimisée du paramètre à toutes les mailles constitutives du bassin versant sur lequel est conduit le calage,
- soit un calage spatialement distribué qui attribue, pour un paramètre donné, des valeurs différenciées selon les mailles.

### 5.2.1 Calage spatialement uniforme

L'algorithme de calage pas à pas (Edijatno et Michel, 1989) implémenté dans SMASH est un algorithme simple de recherche globale de la valeur optimale d'une fonction de coût évaluant les écarts entre débits observés et simulés (Équation 5.2). L'algorithme fonctionne en diminuant ou en augmentant les valeurs des paramètres du modèle, dans leur plage prédéfinie et avec des transformations logarithmiques. L'algorithme s'initialise à partir des paramètres définis par l'utilisateur. La fonction de coût utilisée dans le cadre d'un calage spatialement uniforme est le critère de Nash-Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 1970)  $J_{nash}$  (Équation 3.2).

### 5.2.2 Calage spatialement distribué

La complexité du modèle hydrologique SMASH tient en partie à sa spatialisation. L'algorithme de calage variationnel présenté dans Jay-Allemand *et al.* (2019) et permettant le calage spatialement distribué des paramètres du modèle est utilisé ici pour résoudre le problème d'optimisation (Equation 5.2). Cet algorithme considère un « first guess » (prior)  $\theta^{(0)}$  spatialement uniforme obtenu à l'aide d'un algorithme d'optimisation uniforme (5.2.1). La minimisation de la fonction de coût  $J(\theta)$  est ensuite effectuée à l'aide d'un algorithme de descente de type quasi-Newton (LBFGS-B, Limited memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno Bound-constrained Zhu *et al.*, 1994) qui utilise les gradients de la fonction de coût. Ils sont obtenus par la résolution du modèle adjoint généré par différentiation automatique du code source de SMASH avec l'outil TAPENADE (Hascoet et Pascual, 2013).

La fonction de coût utilisée ici est le critère de Nash-Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 1970)  $J_{nash}$  (Équation 3.2). La figure 5.2 illustre le résultat d'un tel calage pour le paramètre de production  $cp$  sur un bassin versant.

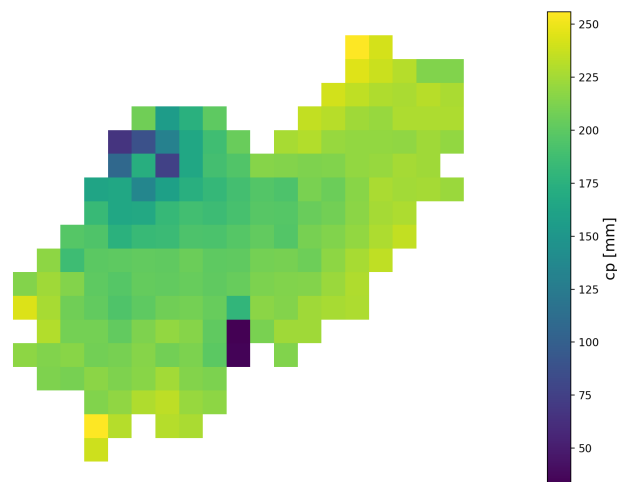


FIGURE 5.2 – Exemple de distribution spatiale du paramètre de production  $cp$  obtenue sur le bassin versant 'Les Ussets à Musièges' (Haute-Savoie) avec l'algorithme de calage variationnel, à une résolution spatiale de  $1 \text{ km}^2$ .

## 5.3 Tests d'hypothèse et amélioration de la structure du modèle SMASH en calage spatialement uniforme

Cette section présente les différentes hypothèses qui ont été testées pour améliorer la structure du modèle SMASH, présentée dans la section 5.1. Des développements ont été apportés et évalués à partir d'expériences de calage-validation. Ces expériences ont été menées en effectuant une calibration spatialement uniforme des paramètres (voir section 5.2.1) uniquement. Il s'agit en effet avant tout d'améliorer le modèle en faisant évoluer sa structure, indépendamment de la méthodologie de calage. Les améliorations apportées dans le cadre du projet HYDRODEMO concernent :

- la modélisation de la neige au pas de temps horaire, à la suite du travail mené sur l'introduction d'un module neige en 2020 au pas de temps journalier (Colleoni, 2020),
- les opérateurs conceptuels de la partie hydrologique du modèle, en partie ceux réglant le transfert des volumes ruisselés au sein de la maille.

Dans l'ensemble de cette section, deux séries de simulations sont utilisées comme références et éléments de comparaison pour évaluer les gains apportés par les différentes structures du modèle SMASH proposées et testées :

- MORDOR, les simulations effectuées avec le modèle MORDOR-SD (Mas et Evin, 2021).
- SMASH v0, les simulations effectuées avec la structure initiale du modèle SMASH à 3 paramètres  $cp$ ,  $ctr$  et  $cr$  (figure 5.1).

### 5.3.1 Module neige

Des travaux d'introduction d'un module neige ont été précédemment menés avec la version SMASH v0 à 3 paramètres libres au pas de temps journalier (Colleoni, 2020). Le module neige qui a été validé dans cette étude est le module neige CemaNeige (Valery, 2010) (figure 5.3). Dans le cadre du projet

HYDRODEMO, ce module neige a été testé dans SMASH, au pas de temps horaire, sur l'échantillon des 55 bassins versants alpins du projet. Cette version SMASH v0.CemN est comparée avec les modèles MORDOR et SMASH v0. La figure 5.4 montre la distribution des critères de Nash en validation pour ces 3 modèles.

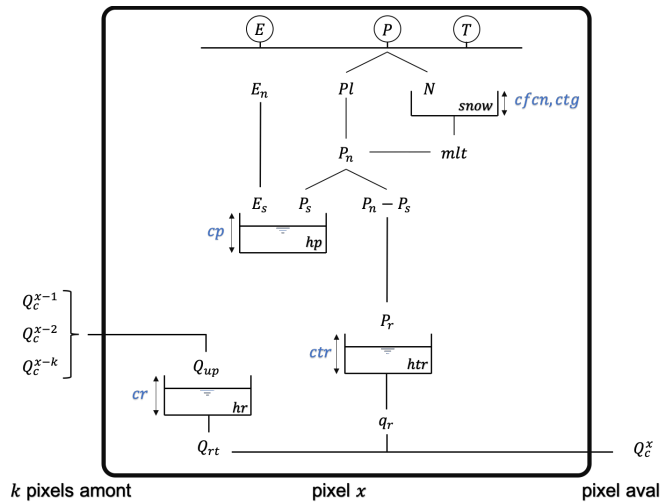


FIGURE 5.3 – Schéma du modèle SMASH v0.CemN.

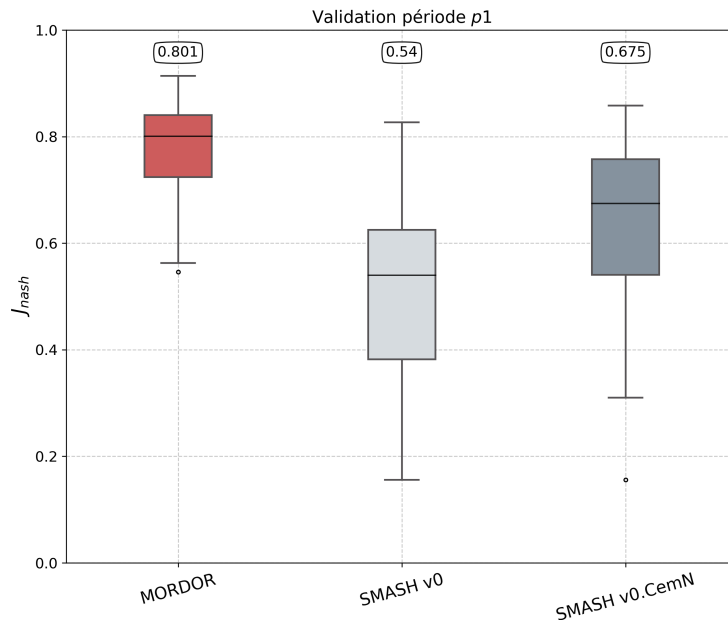


FIGURE 5.4 – Comparaison des résultats après implémentation du module neige CemaNeige dans le modèle SMASH sur l'ensemble des bassins versants et la période de validation  $p1$ . Le calage de chacune des structures du modèle SMASH a été effectué via l'algorithme de calibration spatialement uniforme. La valeur médiane est fournie, pour chaque boxplot, dans l'encadré.



L'implémentation du module neige dans le modèle SMASH engendre un gain conséquent en terme de performance globale de simulation des débits, traduite par le gain de Nash en validation visualisable en figure 5.4. Un module de neige est en effet nécessaire pour mieux reproduire le comportement des bassins nivaux et nivo-glaciaires du jeu de bassins localisés dans les Alpes du Nord et en particulier les signatures hydrologiques saisonnières déclenchées par la fonte des neiges. Cependant, les performances restent perfectibles comparées avec MORDOR-SD. L'implémentation d'un module neige dans SMASH est donc nécessaire dans le cadre d'une modélisation des processus nivaux mais cependant non suffisante. D'autres améliorations de la structure du modèle semblent nécessaires.

La suite du travail de développement du modèle SMASH a porté sur la complexification des opérateurs hydrologiques tout en conservant ce module neige.

### 5.3.2 Hydrologie

#### Transfert lent

La version à 3 paramètres libres, SMASH v0, semble trop simpliste notamment vis-à-vis des différentes structures testées en journalier dans une précédente étude (Organde, 2018) où une complexification de la structure du modèle avait permis d'en améliorer les performances. Une première étape de complexification a été d'ajouter un paramètre libre supplémentaire au sein de la maille, le paramètre  $\alpha$ , qui introduit un partitionnement de la pluie ruisselée entre deux réservoirs de transfert, la capacité du deuxième étant le carré de la capacité  $ctr$  du premier (figure 5.5). Les performances de cette nouvelle version, notée SMASH v1.CemN, sont présentées en figure 5.6.

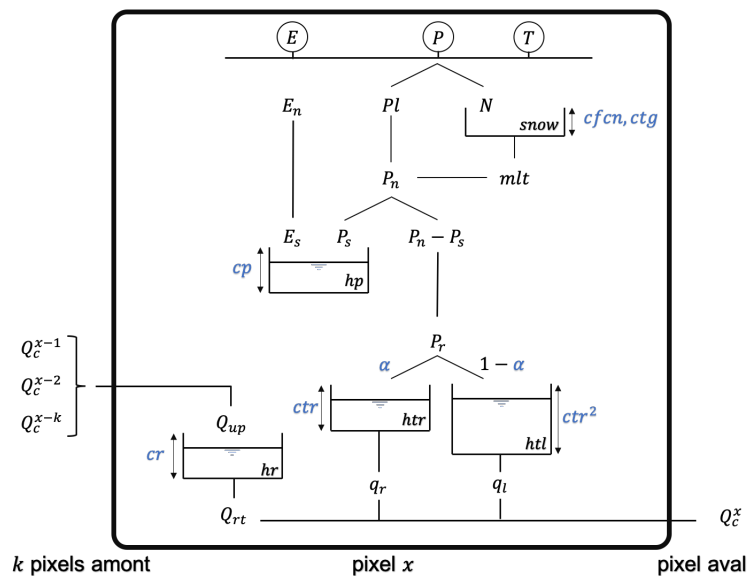


FIGURE 5.5 – Schéma du modèle SMASH v1.CemN.

Les performances de cette nouvelle version introduisant une composante d'écoulement, considéré comme lent du fait de sa paramétrisation, sont satisfaisantes avec un gain conséquent en terme de performance globale sur le critère de Nash mais restent plus faibles que celles de MORDOR-SD.

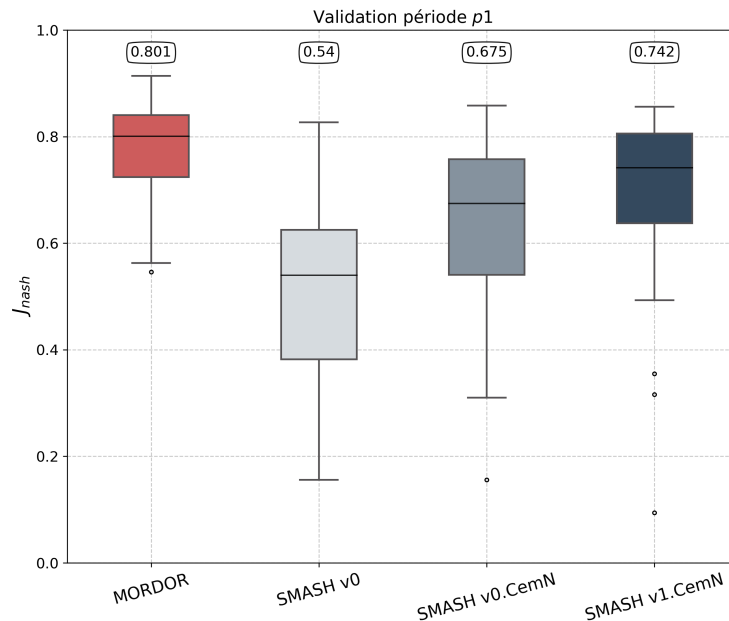


FIGURE 5.6 – Comparaison des résultats après l’ajout d’une composante d’écoulement lent dans le modèle SMASH sur l’ensemble des bassins versants et la période de validation  $p1$ . Le calage de chacune des structures du modèle SMASH a été effectué via l’algorithme de calibration spatialement uniforme. La valeur médiane est fournie, pour chaque boxplot, dans l’encadré.

## Flux non-conservatif

Actuellement, le modèle SMASH conserve le bilan de masse. Contrairement à MORDOR-SD ou GR, aucun paramètre et/ou opérateur n’y est implémenté afin d’engendrer des flux non-conservatifs. Ces flux non conservatifs permettraient de représenter des gains ou des pertes dans le bilan de masse du bassin versant. C’est pourquoi une dernière étape d’amélioration propose l’ajout d’une possibilité de perte ou de gain dans le bilan de masse, basée sur la modélisation des flux non conservatifs dans les modèles GR (figure 5.7). Elle introduit également un nouveau partitionnement de la pluie ruisselante, en amont des deux réservoirs de transfert.

Le nouveau partitionnement oriente 10% de la pluie ruisselante directement en sortie de maille par un transfert direct, les 90% restants sont orientés vers le partitionnement contrôlant l’entrée dans les deux réservoirs de transfert et gouverné par le paramètre  $\alpha$ . Les deux réservoirs de transfert sont ici décorrélés, chacun étant paramétré par sa propre capacité,  $ctr$  et  $ctl$ , cette dernière capacité devenant un nouveau paramètre. Les flux non conservatifs sont contrôlés par un paramètre de fuite  $ml$  qui intervient à deux niveaux : au niveau du transfert direct dans la maille, et au niveau du réservoir de transfert de capacité  $ctr$ . Les performances de cette nouvelle version, notée SMASH v2.CemN, sont présentées en figure 5.8.

On constate que l’introduction d’un flux non-conservatif dans la structure du modèle permet d’améliorer de manière significative ses performances. Les performances en terme de Nash sont légèrement plus faibles que celles de MORDOR-SD en valeur médiane mais plus satisfaisantes en terme de premier quartile sur la période de validation  $p1$ . L’écart que présentait la version initiale du modèle par rapport

au modèle MORDOR-SD a été largement comblé à travers les différentes étapes d'amélioration de sa structure.

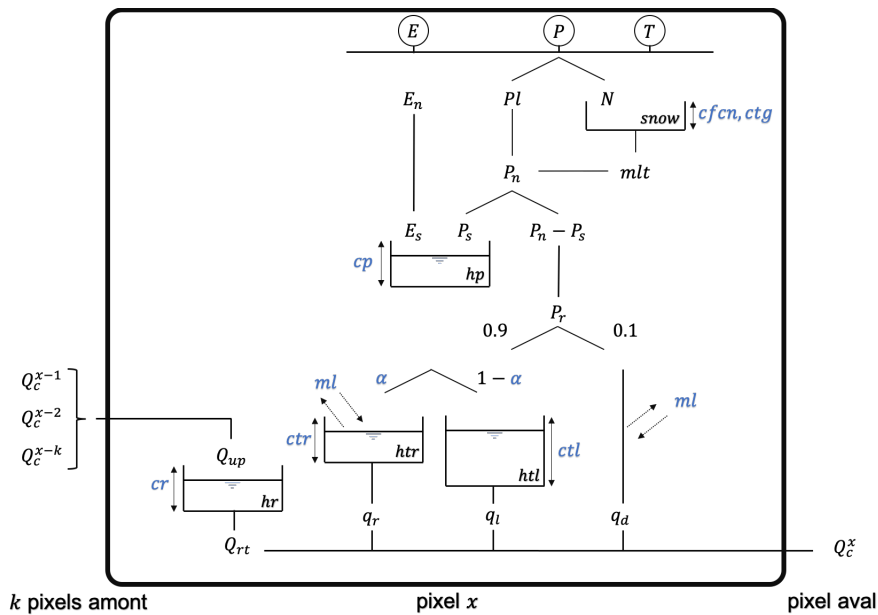


FIGURE 5.7 – Schéma du modèle SMASH v2.CemN.

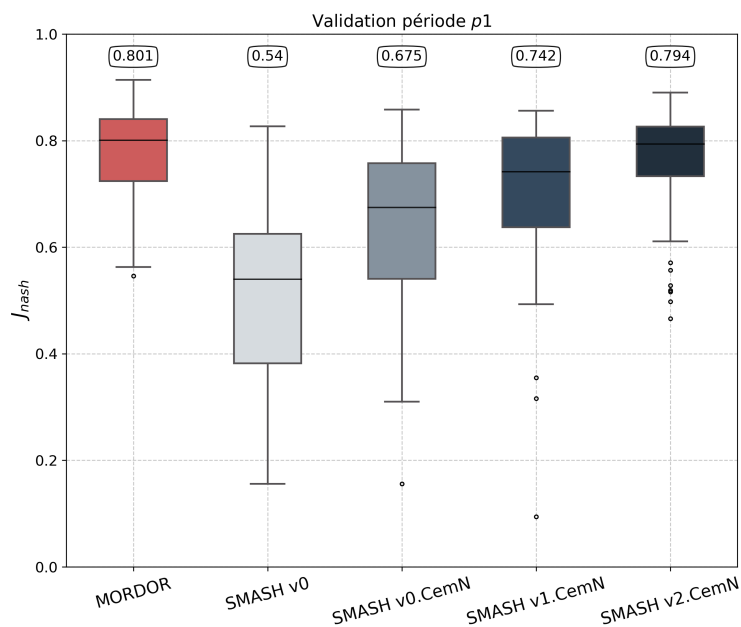


FIGURE 5.8 – Comparaison des résultats après l'ajout d'un flux non-conservatif dans le modèle SMASH sur l'ensemble des bassins versants et la période de validation  $p1$ . Le calage de chacune des structures du modèle SMASH a été effectué via l'algorithme de calibration spatialement uniforme. La valeur médiane est fournie, pour chaque boxplot, dans l'encadré.

### 5.3.3 Synthèse

Cette section a permis de mettre en évidence l'intérêt d'améliorer la structure du modèle SMASH dans l'objectif de mieux simuler les débits des bassins versants des Alpes du Nord et d'obtenir des performances en calage-validation similaires à celles du modèle MORDOR-SD. La version SMASH v2.CemN constitue la dernière version testée présentant le plus grand gain de performance par rapport à la version initiale du modèle. Le modèle initialement à 3 paramètres (production  $cp$ , transfert  $ctr$  et routage  $cr$ ) se voit enrichi de 5 nouveaux paramètres : 2 paramètres pour le module neige, coefficient  $\alpha$  de répartition entre les deux réservoirs de transfert au pixel, capacité  $ctl$  du 2ème réservoir de transfert et paramètre de fuites  $ml$ .

Un nombre d'opérateurs hydrologiques et de paramètres plus conséquent rend cependant le problème d'optimisation globale plus délicat. Il induit notamment pour notre algorithme de calage pas à pas plusieurs problèmes dont une sensibilité aux valeurs initiales des paramètres, une complexification du chemin parcouru dans l'espace des paramètres et un nombre élevé d'itérations avant la convergence de l'algorithme vers un optimum de la fonction de coût. L'identification et le test d'autres algorithmes de calage uniforme nécessiteront des travaux de recherche spécifiques, avec un plus large échantillon de bassins versants. Ces travaux sortent du cadre du projet HYDRODEMO, axé sur la modélisation hydrologique des bassins versants des Alpes du Nord et non sur des développements d'algorithmes d'optimisation pour les modèles hydrologiques distribués. Nous sommes parvenus malgré ces contraintes à apporter au modèle SMASH des développements pertinents pour sa mise en œuvre en zone de montagne.



## Chapitre 6

# Intercomparaison des résultats des modèles

Dans cette partie, nous proposons de comparer les performances des modèles MORDOR-SD et SMASH par le biais de quatre expériences numériques : (i) en validation, à l'issue de l'expérience de calage-validation, (ii) en calage sur la période complète, (iii) en contexte non jaugé à l'issue d'une expérience de régionalisation par transfert des paramètres et (iv) en prédétermination par une comparaison des quantiles issues des chroniques de débits calculés par les modèles calés localement et par les modèles régionalisés. Cette comparaison a été effectuée sur les performances globales des modèles, évaluées par l'adéquation entre les séries de débit simulés et observés, mesurée à l'aide des critères de Nash-Sutcliffe et KGE, ainsi que sur les performances en terme de dépassements des seuils d'avertissement, évaluées à l'aide des critères de contingence.

Nous retenons comme structure pour le modèle SMASH la structure la plus performante identifiée en partie 5.3. Il s'agit de la version SMASH v2.CemN à 6 paramètres hydrologiques  $cp$ ,  $ctr$ ,  $ctl$ ,  $\alpha$ ,  $ml$  et  $cr$  (avec 3 branches de transfert au sein du pixel : transfert direct pour 10% de la pluie ruisselante, réservoir de transfert de capacité  $ctr$  pour une partition  $\alpha \times 90\%$  de la pluie ruisselante et réservoir de transfert de capacité  $ctl$  pour le reste, modélisation des pertes avec le paramètre  $ml$ ) et 2 paramètres pour le module neige. Les deux méthodes de calage du modèle SMASH présentées en partie 5.2, calage spatialement uniforme et calage spatialement distribué, ont été mises en place pour cette intercomparaison. La simulation SMASH en calibration spatialement uniforme est notée SMASH uni, celle en en calibration spatialement distribuée est notée SMASH dst. Pour chacune des expériences numériques, l'intercomparaison des modèles MORDOR-SD et SMASH a été réalisée sur l'échantillon de 55 bassins versants et sur les forçages COMEPHORE et SPAZM sur la période 1997-2017.

### 6.1 Performances comparées en calage-validation

Dans l'ensemble de cette section consacrée à l'expérience de calage-validation, seules les périodes de validation  $p1$  et  $p2$  ont été utilisées pour la comparaison des deux modèles.

#### 6.1.1 Performances globales

Les boxplots ci-après montrent les performances globales des modèles MORDOR-SD, SMASH uni (calage uniforme) et SMASH dst (calage distribué) en termes de critères de Nash-Sutcliffe (figures 6.1 et 6.3) et KGE (figures 6.2 et 6.4) pour les forçages COMEPHORE et SPAZM et pour chacune des deux périodes de validation  $p1$  et  $p2$ . Pour les modèles SMASH, c'est la structure SMASH v2.CemN (cf. partie 5.3) qui est mise en œuvre. Ces critères font apparaître les résultats suivants :

- une sensibilité des performances aux forçages pluviométriques. Comme observé avec les résultats obtenus avec MORDOR-SD (Mas et Evin, 2021), les performances des deux modèles ne sont pas similaires selon le forçage d'entrée. Les performances issues des forçages SPAZM sont nettement plus faibles que celles issues des forçages COMEPHORE quelle que soit la période de validation, quel que soit le modèle et quel que soit le critère de performance. Cette dégradation des performances avec les forçages SPAZM est expliquée par les limites de la méthode de désagrégation temporelle de SPAZM (disponible au pas de temps journalier) à l'aide des réanalyse SAFRAN (disponible au pas de temps horaire) ;
- pour le modèle SMASH en validation, une meilleure performance, toutes périodes confondues, et quel que soit le forçage d'entrée, lorsqu'un calage spatialement distribué est appliqué au modèle par rapport à un calage spatialement uniforme ;
- une relative similarité en terme de performances générales des modèles avec de meilleures performances observées pour chacun des modèles avec le critère avec lequel ils ont été calés (critère KGE pour MORDOR-SD, critère de Nash-Sutcliffe pour SMASH dist et SMASH uni).

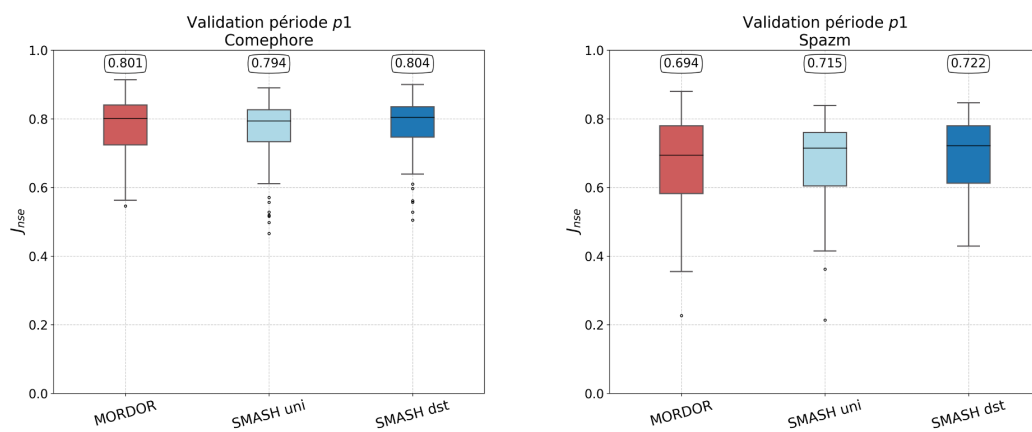


FIGURE 6.1 – Distribution du critère de Nash-Sutcliffe sur la période  $p1$  de validation pour les forçages COMEPHORE (gauche) et SPAZM (droite).

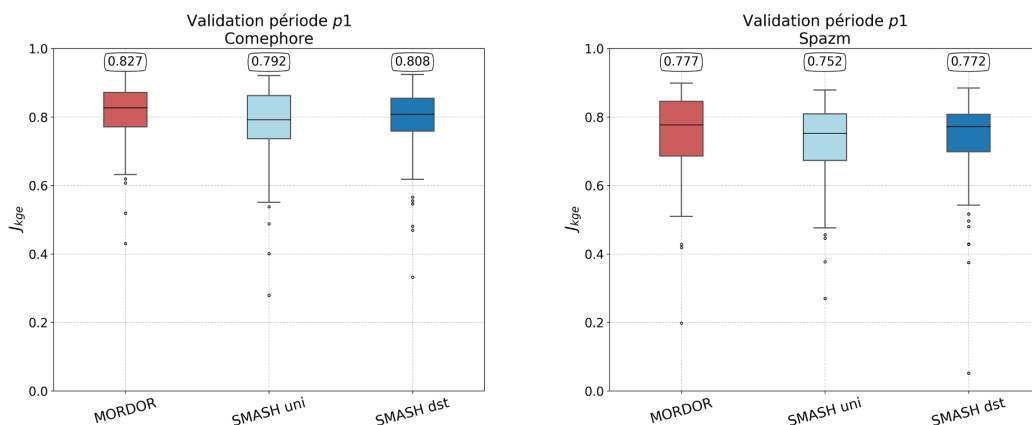


FIGURE 6.2 – Distribution du critère KGE sur la période  $p1$  de validation pour les forçages COMEPHORE (gauche) et SPAZM (droite).

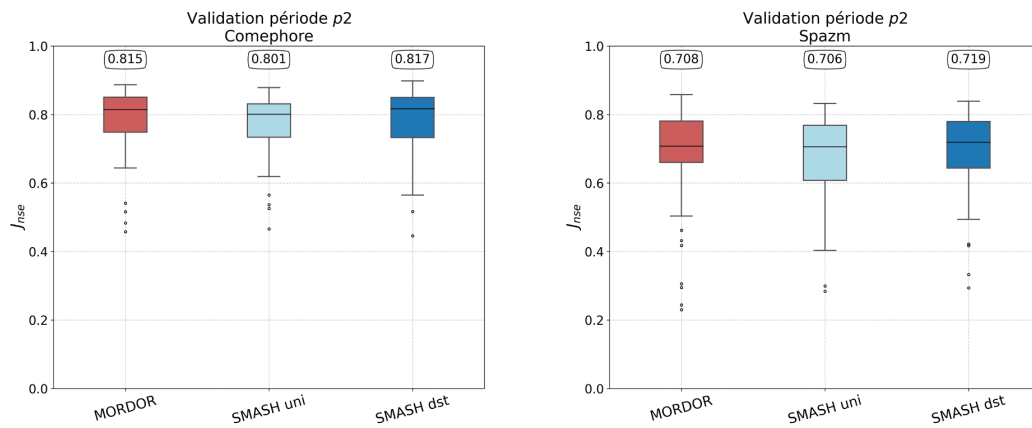


FIGURE 6.3 – Distribution du critère de Nash-Sutcliffe sur la période  $p2$  de validation pour les forçages COMEPHORE (gauche) et SPAZM (droite).

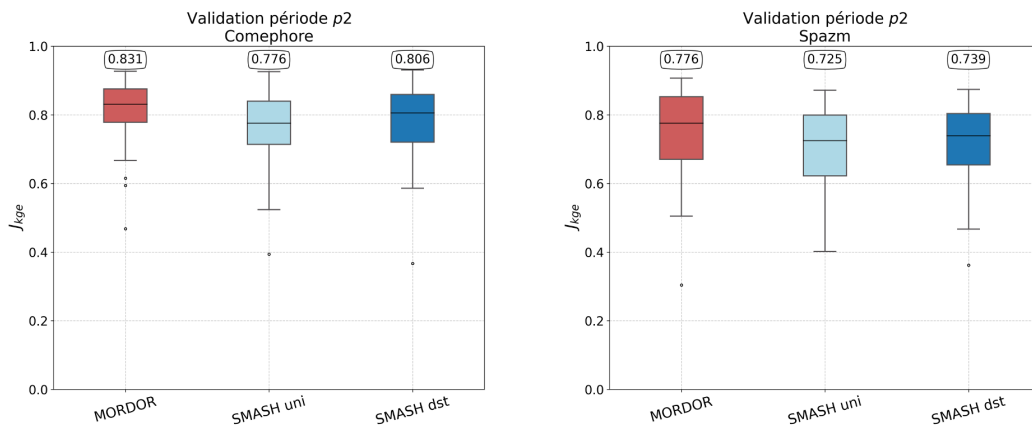


FIGURE 6.4 – Distribution du critère KGE sur la période  $p2$  de validation pour les forçages COMEPHORE (gauche) et SPAZM (droite).

## 6.1.2 Critères de contingence

Les critères de contingence ont été évalués sur les quantiles 2, 5, 10 et 20 ans pour chaque période de validation et chaque forçage (tableaux 6.1 et 6.2). Dans un souci de lisibilité, uniquement le *Critical Success Index* (CSI) est représenté avec les notations suivantes :

- M.S : Simulation MORDOR-SD avec les forçages SPAZM,
- M.C : Simulation MORDOR-SD avec les forçages COMEPHORE,
- Suni.S : Simulation SMASH uni avec les forçages SPAZM,
- Suni.C : Simulation SMASH uni avec les forçages COMEPHORE,
- Sdst.S : Simulation SMASH dst avec les forçages SPAZM,
- Sdst.C : Simulation SMASH dst avec les forçages COMEPHORE.

De manière similaire aux performances globales, les critères de contingences mettent en évidence une différence de performances selon le forçage d'entrée, avec des performances moins satisfaisantes pour les forçages SPAZM. En terme d'inter-comparaison de modèle, l'analyse des critères de contingence est délicate. De manière générale, il semble que le modèle MORDOR-SD propose les meilleurs scores pour la période de validation  $p1$  et le modèle SMASH en calage spatialement uniforme pour



la période  $p2$ . Les scores CSI entre modèles restent relativement proches et assez faibles. Ces faibles valeurs de CSI peuvent être mises en relation avec l'exclusion de l'effectif des alertes correctes de toute alerte en retard dans un intervalle temporel donné. Par ailleurs, calibrer un modèle sur un critère de Nash-Sutcliffe ou KGE ne conduit pas aux meilleures performances en termes de critères de contingences comme l'a montré une étude menée avec le modèle SMASH dans sa version à 2 paramètres en calage uniforme (Demargne *et al.*, 2020). Le modèle SMASH en calibration spatialement uniforme, malgré des performances plus faibles en validation sur les critères NSE et KGE, montre des critères de contingence parfois plus satisfaisants que le modèle MORDOR-SD ou SMASH en calibration spatialement distribuée.

Quantile	M.S	M.C	Suni.S	Suni.C	Sdst.S	Sdst.C
2 ans	0.11	0.2	0.12	0.17	0.13	0.18
5 ans	0.11	0.25	0.1	0.23	0.09	0.24
10 ans	0.08	0.19	0.1	0.16	0.07	0.18
20 ans	0.07	0.1	0.04	0.14	0.05	0.12

TABLE 6.1 – Comparaison du *Critical Success Index* (CSI) sur la période de validation  $p1$  pour les forçages COMEPHORE et SPAZM.

Quantile	M.S	M.C	Suni.S	Suni.C	Sdst.S	Sdst.C
2 ans	0.08	0.15	0.08	0.15	0.07	0.17
5 ans	0.05	0.14	0.05	0.18	0.04	0.16
10 ans	0.06	0.15	0.05	0.18	0.03	0.13
20 ans	0.01	0.12	0.02	0.12	0.01	0.11

TABLE 6.2 – Comparaison du *Critical Success Index* (CSI) sur la période de validation  $p2$  pour les forçages COMEPHORE et SPAZM.

## 6.2 Performances comparées au calage période complète

Dans l'ensemble de l'exercice de calage période complète, la période  $p3 = p1 + p2$  a été utilisée pour la comparaison des modèles MORDOR-SD, SMASH uni (calage uniforme) et SMASH dst (calage distribué). Pour les modèles SMASH, c'est la structure SMASH v2.CemN (cf. partie 5.3) qui est mise en œuvre.

### 6.2.1 Performances globales

Comme précédemment, les performances globales des modèles ont été évaluées sur l'adéquation entre les séries de débits simulés et observés, en termes de critères de Nash-Sutcliffe et KGE pour les forçages COMEPHORE et SPAZM (figures 6.5 et 6.6). Les critères obtenus pour ces calibrations "période complète" montrent les performances "maximales" que peuvent proposer les modèles sur une période temporelle et un bassin donné.

Comme dans la partie calage-validation, on constate que les performances des modèles sont moins bonnes en prenant comme forçages d'entrée les données SPAZM. Concernant la comparaison des modèles, on note que :

- avec le critère de Nash-Sutcliffe (figure 6.5), les performances entre modèles sont similaires. On rappelle que le critère de Nash-Sutcliffe est le critère de calage du modèle SMASH et non de MORDOR-SD ;

- avec le critère KGE (figure 6.6), les performances de MORDOR-SD sont significativement meilleures que celles du modèle SMASH avec une médiane supérieure à 0.9 avec l'utilisation des forçages COMEPHORE. On rappelle qu'une fonction objective composée de trois critères KGE (débits, régime et débits classés) constitue le critère de calage de MORDOR-SD, le modèle SMASH étant calé avec le critère de Nash-Sutcliffe.

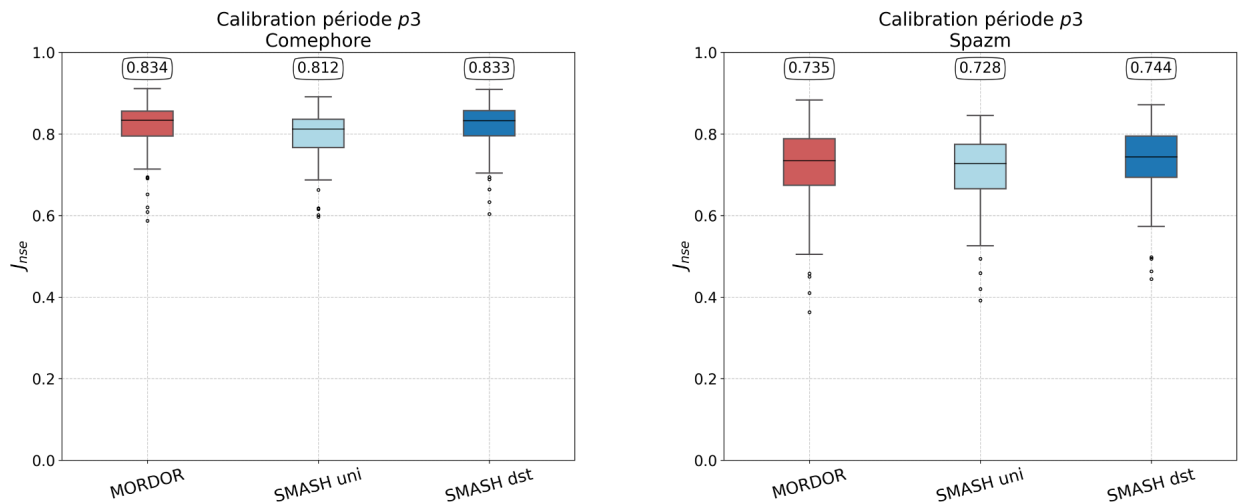


FIGURE 6.5 – Comparaison des performances globales en terme de Nash-Sutcliffe sur la période  $p3$  de calibration pour les forçages COMEPHORE (gauche) et SPAZM (droite). SMASH uni (resp. SMASH dst) représente les résultats du modèle SMASH en calage spatialement uniforme (resp. distribué). La structure du modèle SMASH correspond à la structure SMASH v2.CemN présentée à la partie 5.3.

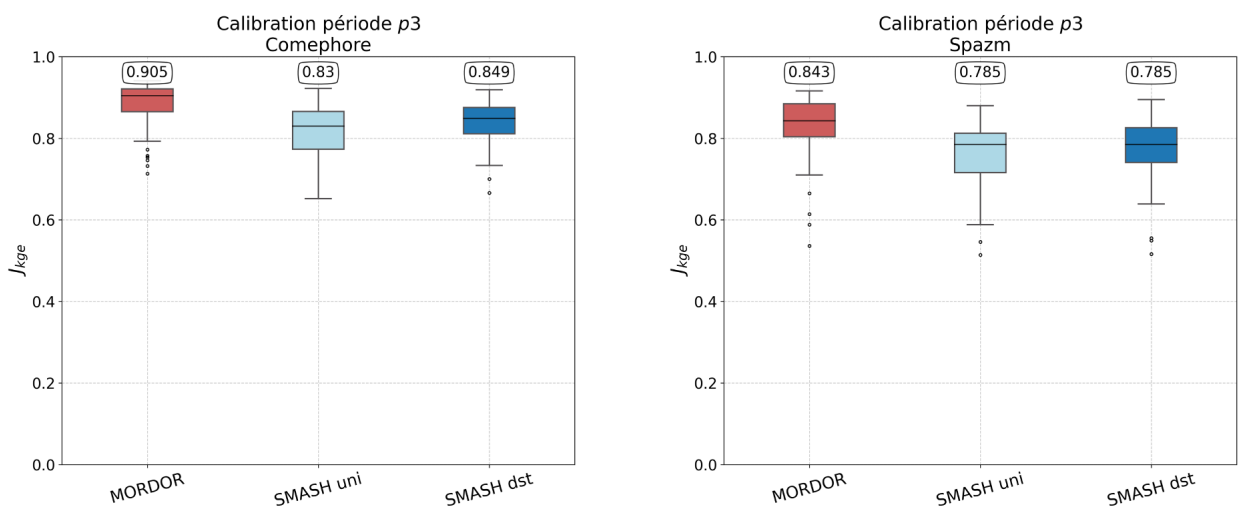


FIGURE 6.6 – Comparaison des performances globales en terme de KGE sur la période  $p3$  de calibration pour les forçages COMEPHORE (gauche) et SPAZM (droite). SMASH uni (resp. SMASH dst) représente les résultats du modèle SMASH en calage spatialement uniforme (resp. distribué). La structure du modèle SMASH correspond à la structure SMASH v2.CemN présentée à la partie 5.3.

## 6.2 Critères de contingence

Les critères de contingence ont été évalués sur les quantiles 2, 5, 10 et 20 ans pour la période de calibration  $p3$  et chaque forçage (tableau 6.3). Les notations sont identiques à celles de la partie 6.1.2.

Quantile	M.S	M.C	Suni.S	Suni.C	Sdst.S	Sdst.C
2 ans	0.11	0.2	0.12	0.2	0.13	0.23
5 ans	0.11	0.25	0.1	0.22	0.09	0.26
10 ans	0.08	0.24	0.1	0.18	0.07	0.21
20 ans	0.07	0.15	0.04	0.16	0.05	0.16

TABLE 6.3 – Comparaison du *Critical Success Index* (CSI) sur la période de calibration  $p3 = p2 + p1$  pour les forçages COMEPHORE et SPAZM.

Comme déjà évoqué dans l'expérience précédente de validation, les valeurs de CSI sont faibles. Il est néanmoins possible de constater (i) que les performances sur les dépassements de seuil sont meilleures avec le forçage COMEPHORE, quel que soit le modèle, et que (ii) les meilleurs CSI sont obtenus avec le modèle SMASH avec un calage spatialement distribué, suivi de près par MORDOR-SD.

## 6.3 Performances comparées en contexte non jaugé

L'extension en contexte non jaugé a été menée selon la méthodologie détaillée au paragraphe 3.1.3. L'échantillon des bassins versants disponibles a été scindé en deux sous-échantillons de 26 bassins. Chaque sous-échantillon est alors alternativement considéré comme échantillon donneur et comme échantillon non jaugé. Les valeurs optimisées des paramètres de l'échantillon donneur, issues du calage sur la période complète  $p3$ , servent à la régionalisation. On rappelle que la régionalisation porte sur les 8 paramètres du modèle SMASH et 7 paramètres du modèle MORDOR-SD. Le modèle régionalisé est ensuite mis en œuvre sur l'échantillon non jaugé et les débits modélisés sont comparés avec les observations. Les 3 méthodes de régionalisation présentées au paragraphe 3.1.3 sont testées et comparées : transfert uniforme optimal, transfert uniforme médian et indice de similarité.

En raison des faibles performances obtenues par les modèles MORDOR-SD et SMASH alimentés par les forçages SPAZM dans les expériences numériques précédentes (calage-validation et calage période complète), ces forçages SPAZM n'ont pas été utilisés dans le cadre de l'extension des modèles en contexte non jaugé. Le travail de régionalisation a été uniquement conduit en utilisant les forçages COMEPHORE. Les résultats de ce travail de régionalisation sont synthétisés sur les figures 6.7 pour le critère de Nash-Sutcliffe et 6.8 pour le KGE. Les 3 méthodes de régionalisation y sont notées à l'aide des suffixes suivants pour chaque modèle : **opt**, pour le "Transfert uniforme optimal" (paire de boxplots à gauche) ; **med**, pour le "Transfert uniforme median" (paire de boxplots au centre) et **sim**, pour l' "Indice de similarité" (paire de boxplots à droite).

Les distributions des critères de Nash-Sutcliffe et de KGE, obtenus sur les sous-échantillons de bassins considérés successivement comme "non-jaugés", montrent que :

- en termes de Nash, les performances sont globalement meilleures pour chaque modèle et chaque méthode de régionalisation pour le groupe 2 par rapport au groupe 1, avec des valeurs médianes plus élevées et une dispersion moindre autour de ces médianes ; on ne constate pas une telle différence entre les deux sous-échantillons avec le KGE ;

- pour SMASH, que ce soit en calage uniforme ou distribué, la méthode de régionalisation amenant aux meilleures performances, aussi bien vis-à-vis du critère de Nash que du KGE, est la méthode de "Transfert uniforme optimal" ;
- pour MORDOR-SD, si le "Transfert uniforme optimal" conduit globalement à de meilleures performances également, il se distingue un peu moins de la méthode "Transfert uniforme médian" sur le groupe 2 ;
- les performances médianes avec la méthode "Transfert uniforme optimal" sont légèrement meilleures avec le modèle SMASH qu'avec le modèle MORDOR-SD en terme de Nash, et équivalente en terme de KGE. Les performances globales sont meilleures avec SMASH si on considère la dispersion de ces performances, avec notamment les premiers quartiles (valeur inférieure de la "boîte") des critères Nash et KGE qui est systématiquement plus élevé avec SMASH.

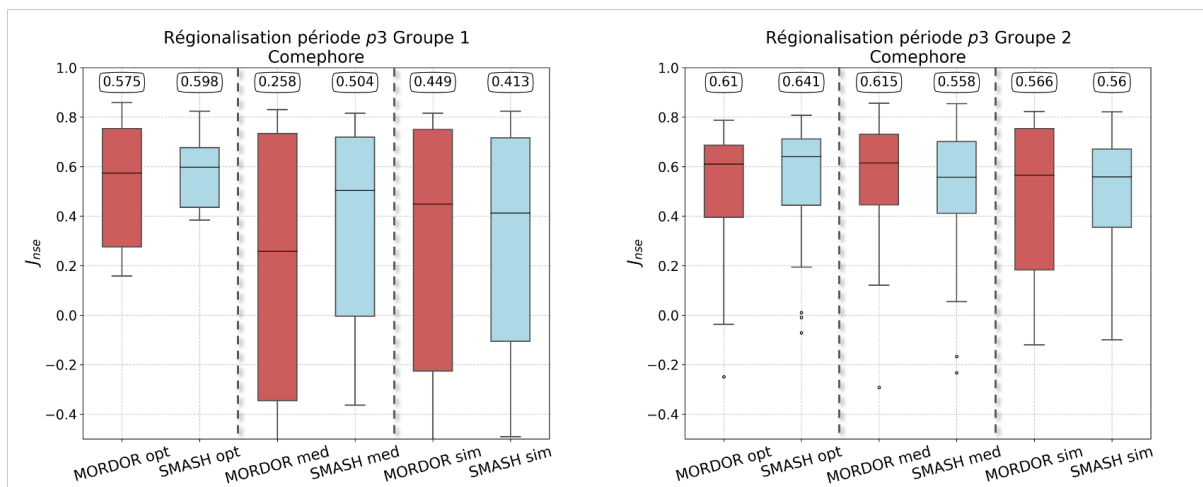


FIGURE 6.7 – Comparaison des performances globales en terme de Nash-Sutcliffe sur la période  $p3$  de régionalisation pour les forçages COMEPHORE et pour chaque sous-échantillon (Groupe 1, Groupe 2) considéré successivement comme non-jaugé.

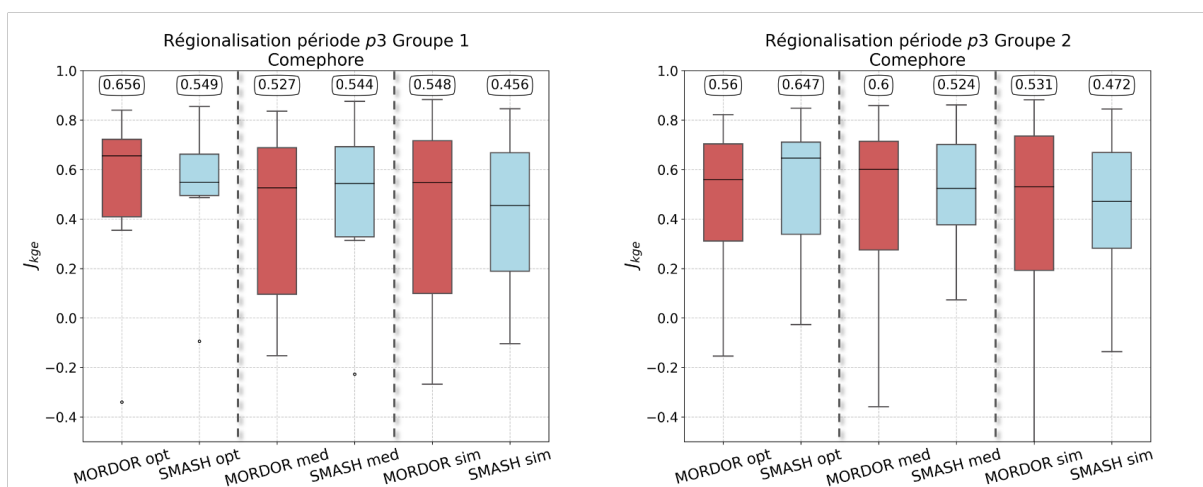


FIGURE 6.8 – Comparaison des performances globales en terme de KGE sur la période  $p3$  de régionalisation pour les forçages COMEPHORE et pour chaque sous-échantillon (Groupe1, Groupe2) considéré successivement comme non-jaugé.

Il ressort de cet exercice comparé de régionalisation que les meilleurs résultats en terme de validation en contexte non jaugé sont obtenus avec la méthode de "Transfert uniforme optimal".

Il nous est apparu intéressant d'étudier plus précisément bassin par bassin la répartition des performances de cette régionalisation en fonction du comportement hydrologique des bassins. Ce comportement peut être résumé à l'aide des coefficient de ruissellement  $Q/P$  et indice d'humidité  $P/E$  calculés avec les lames d'eau précipitées  $P$  et écoulées  $Q$  moyennes inter-annuelles et l'évapotranspiration  $E$  moyenne inter-annuelle. La figure 6.9 représente les performances ( $J_{nse}$ ) obtenues en régionalisation pour les différentes valeurs de coefficient de ruissellement  $Q/P$  et indice d'humidité  $P/E$  associées.

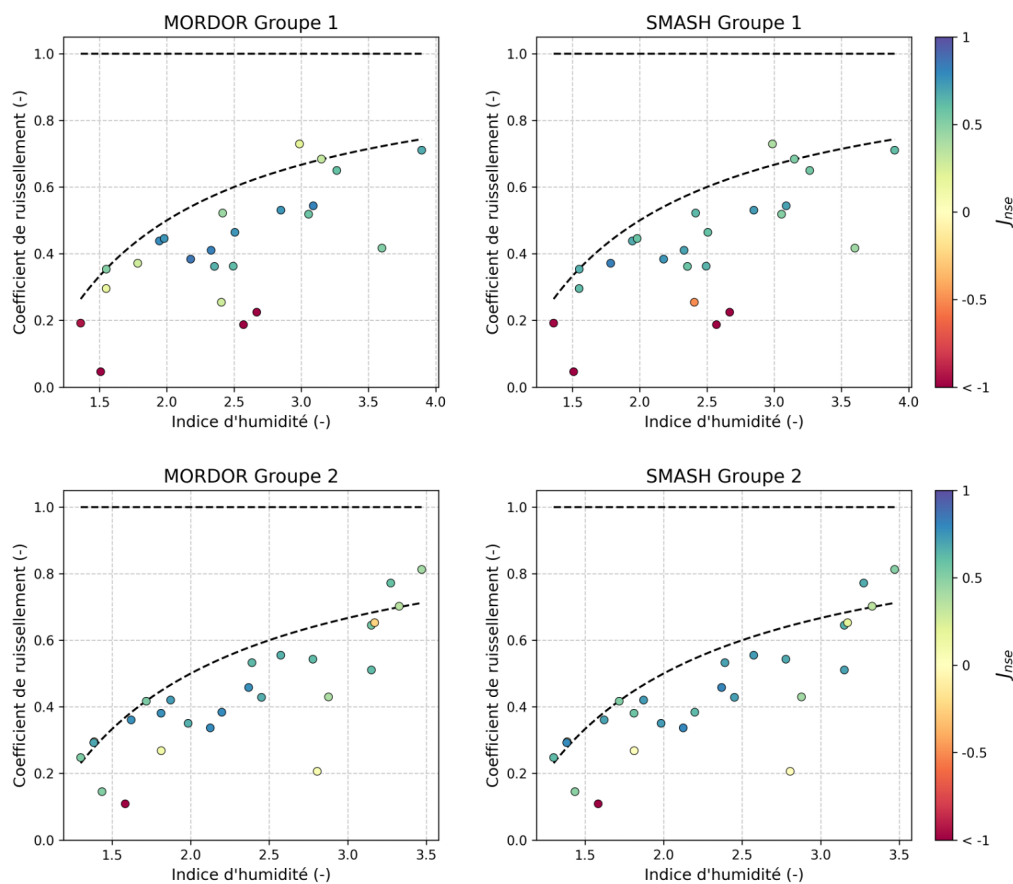


FIGURE 6.9 – Distribution des performances avec la méthode de "Transfert uniforme optimal" des modèles MORDOR-SD et SMASH selon le régime hydrologique des bassins versants pour chaque groupe considéré successivement comme non-jaugé sur le critère de Nash-Sutcliffe. Coefficient de ruissellement =  $Q/P$ ; Indice d'humidité =  $P/E$  avec  $Q$  le débit moyen inter-annuel,  $P$  la pluie incidente moyenne inter-annuelle et  $E$  l'évapotranspiration moyenne inter-annuelle.

On constate que ce sont les mêmes bassins qui sont bien et mal restitués par les deux modèles. Globalement, les bassins avec un faible coefficient de ruissellement montrent de mauvaises performances. La mise en œuvre sur tous les bassins du jeu unique de paramètres obtenu par la méthode de "Transfert uniforme optimal" ne permet pas de restituer l'ensemble des régimes hydrologiques du jeu de bassins et en particulier les plus extrêmes. La problématique de non représentativité de toute une gamme de comportements hydrologiques différents par un jeu unique de paramètres serait la même avec la méthode "Transfert uniforme médian".

La figure 6.9 confirme également la différence en terme de performances déjà constatée entre le groupe 1 et le groupe 2, avec de meilleures performances pour le groupe 2. Cette différence semble s'expliquer par le plus petit nombre de bassins avec un faible coefficient de ruissellement dans le groupe 2.

Malgré ces limites, nous avons choisi de retenir la méthode de "Transfert uniforme optimal" pour la régionalisation des paramètres des modèles. La suite des travaux menés dans le cadre du projet, avec en particulier la mise en œuvre des modèles régionalisés pour le calcul des quantiles à partir de chroniques de pluie longue durée, utilise donc cette méthode qui conduit aux meilleures performances globales en terme de restitution des débits observés, parmi les trois méthodes testées dans le cadre de ce projet.

## 6.4 Performances comparées sur le calcul des quantiles

Le terme de quantile permet d'associer à une valeur particulière de débit, la période de retour correspondante en années ou bien sa fréquence d'apparition. La connaissance des quantiles de débits est requise en prédétermination des crues pour la conception des aménagements des cours d'eau (digues, évacuateurs de crue de barrages, ...), le dimensionnement des ouvrages de franchissement (ponts, buses, ...) ou encore la cartographie réglementaire des zones inondables dans le cadre des Plans de prévention des risques inondation. La détermination classique de ces quantiles passe par l'ajustement de lois statistiques sur les chroniques de débits observés. Sur les bassins non instrumentés, l'utilisation de modèles hydrologiques permet de pallier l'absence de données observées. Ces modèles s'avèrent également utiles en cas de chroniques observées de faible durée, qui rendent délicate la détermination de quantiles pour les fréquences rares.

Le calage et la régionalisation des modèles SMASH et MORDOR-SD sur les Alpes du Nord, qui viennent d'être présentés précédemment, ouvrent des perspectives potentielles pour la connaissance des valeurs statistiques de crue sur les bassins non jaugés. La régionalisation permet en théorie leur mise en œuvre sur tout cours d'eau du territoire. Cependant, au vu de la détérioration constatée des performances en modélisation entre les versions calées et régionalisées des modèles, avec entre 21% et 31% de diminution du critère de Nash-Sutcliffe (figures 6.5 et 6.7) et entre 22% et 38% pour le KGE (figures 6.6 et 6.8), on s'attend à une détérioration des performances de restitution des valeurs des quantiles.

Pour déterminer la qualité des quantiles obtenus à partir des débits modélisés et pour évaluer l'impact de la régionalisation des paramètres des modèles sur les valeurs de ces quantiles, nous comparons les quantiles observés à ceux issus des chroniques simulés par les deux modèles hydrologiques à partir de la totalité des données COMEPHORE, soit 21 années de données de précipitation. Les chroniques calculées sont issues de la mise en œuvre de deux versions de chaque modèle :

- la version calée obtenue par le calage sur la période complète  $p3$  présenté au paragraphe 6.2 ; les quantiles observés et ceux issus des versions calées sont représentés en figure 6.10 pour le modèle SMASH et en figure 6.11 pour le modèles MORDOR-SD ;
- la version régionalisée issue du calage sur la période complète  $p3$  et de la régionalisation selon la méthode "Transfert uniforme optimal", identifiée comme étant la plus satisfaisante au paragraphe 6.3 ; les quantiles observés et ceux issus des versions régionalisées sont représentés en figure 6.12 pour le modèle SMASH et figure 6.13 pour le modèles MORDOR-SD.

Les quantiles de crue observés et modélisés sont calculés pour différentes périodes de retour à partir des échantillons sup-seuils issus des chroniques respectives, par ajustement d'une loi statistique adaptée aux valeurs extrêmes, la loi de Pareto généralisée (GPD).

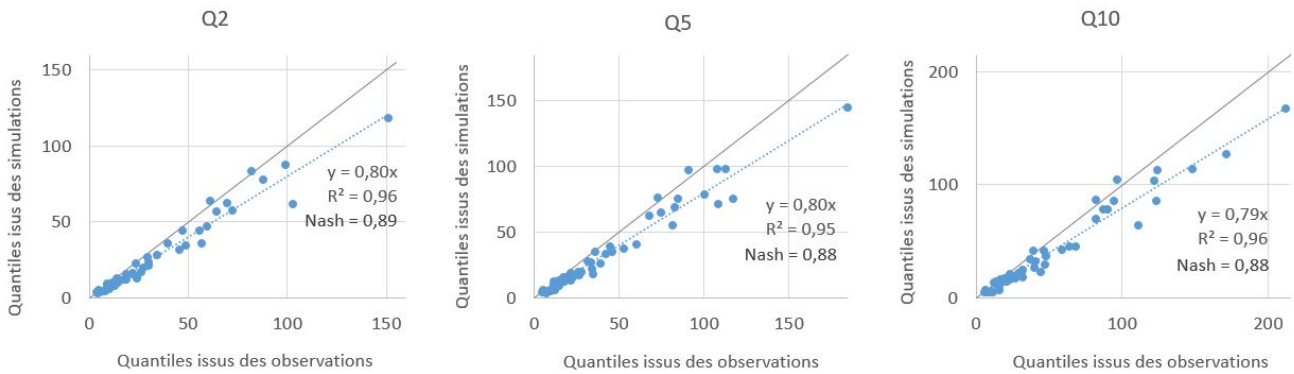


FIGURE 6.10 – Confrontation des quantiles observés et modélisés pour les périodes de retour 2 ans (à gauche), 5 ans (au centre) et 10 ans (à droite). Modélisations effectuées avec SMASH calé sur la période complète  $p3$ .

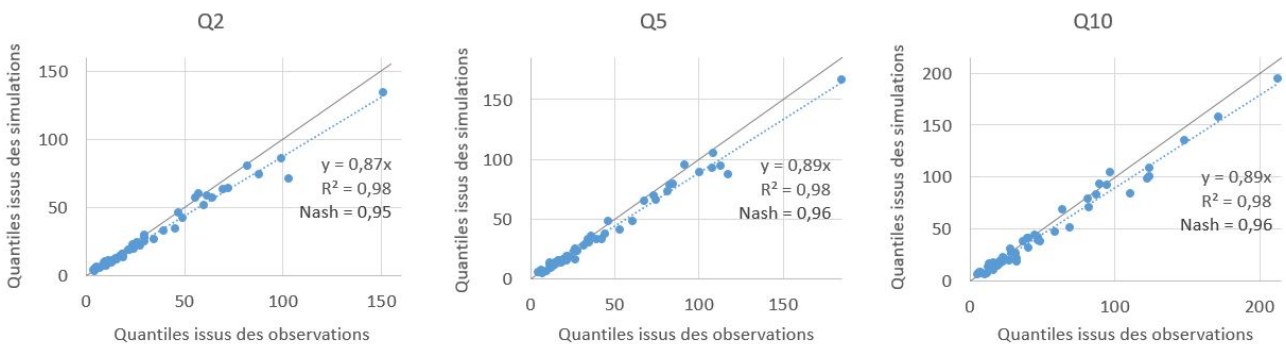


FIGURE 6.11 – Confrontation des quantiles observés et modélisés pour les périodes de retour 2 ans (à gauche), 5 ans (au centre) et 10 ans (à droite). Modélisations effectuées avec MORDOR-SD calé sur la période complète  $p3$ .

On constate que les quantiles issus des modélisations effectuées avec les modèles calés localement sont globalement sous-estimés par rapport aux quantiles issus des observations. Cette sous-estimation est moindre avec le modèle MORDOR-SD (la figure 6.11 montrant des pentes de régression proches de 0.9) qu'elle ne l'est avec le modèle SMASH (la figure 6.10 montrant des pentes de régression de l'ordre de 0.8).

Comme attendu, la mise en œuvre des modèles régionalisés conduit à une détérioration de la restitution des quantiles avec une forte dispersion autour de la bissectrice (figures 6.12 et 6.13). On remarque que cette détérioration est plus accentuée avec le modèle MORDOR-SD régionalisé (critères de Nash-Sutcliffe valant 0.52, 0.52 et 0.54 pour les quantiles 2, 5 et 10 ans respectivement) qu'elle ne l'est avec le modèle SMASH régionalisé (critères de Nash-Sutcliffe valant 0.58, 0.62 et 0.66 pour les mêmes quantiles). Ce résultat est cohérent avec les performances meilleures en restitution globale des crues que nous avons pu constater avec le modèle SMASH régionalisé comparativement à celles obtenues avec le modèle MORDOR-SD régionalisé (figures 6.7 et 6.8).



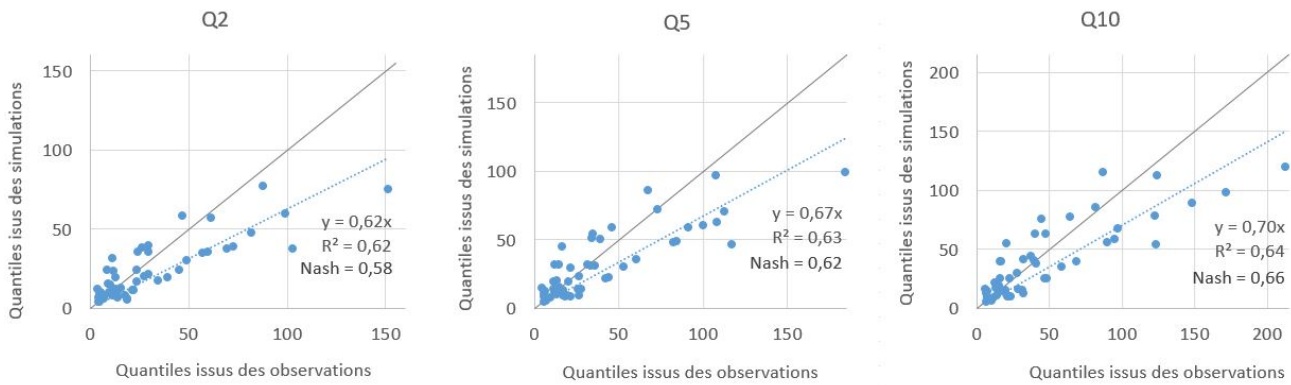


FIGURE 6.12 – Confrontation des quantiles observés et modélisés pour les périodes de retour 2 ans (à gauche), 5 ans (au centre) et 10 ans (à droite). Modélisations effectuées avec SMASH calé sur la période complète *p3* puis régionalisé.

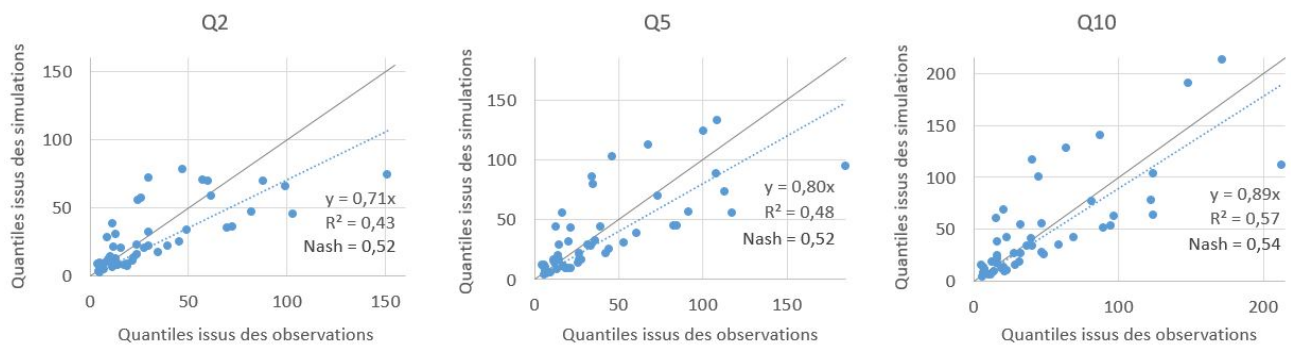


FIGURE 6.13 – Confrontation des quantiles observés et modélisés pour les périodes de retour 2 ans (à gauche), 5 ans (au centre) et 10 ans (à droite). Modélisations effectuées avec MORDOR-SD calé sur la période complète *p3* puis régionalisé.

Pour les deux modèles régionalisés, cette restitution des quantiles issus des observations est au final décevante. Elle apparaît liée à l'étape de régionalisation des paramètres des modèles. Les critères de Nash-Sutcliffe calculés entre quantiles issus des observations et quantiles issus des modèles calés (avant l'étape de régionalisation) sont en effet très corrects : proches de 0.9 pour SMASH (figure 6.10) et supérieurs ou égaux à 0.95 pour MORDOR-SD (figure 6.11). Il nous semble donc délicat, au vu de ces résultats, de proposer, pour le calcul de quantiles et leur utilisation telle quelle en prédétermination, l'utilisation des versions régionalisées de MORDOR-SD et SMASH que nous avons développées dans le cadre de ce présent travail. Le développement d'une méthodologie de régionalisation plus adaptée nécessite des travaux complémentaires. Pour le modèle SMASH, l'utilisation d'un échantillon plus large de bassins versants permettrait de capter davantage de diversités de comportements hydrologiques et de développer une régionalisation à l'échelle nationale avec l'utilisation du calage distribué sous contraintes qui permet de mener en une seule étape le calage et la régionalisation. Ces axes de recherche sont en cours d'exploration pour le compte du Schapi, dans le cadre de la convention pluri-annuelle Multi-risques entre Inrae et le MTE-DGPR. Dans l'immédiat, nous examinons dans le chapitre suivant les possibilités offertes, pour le contexte des Alpes du Nord, par la méthode nationale Shyreg de prédétermination des débits de crue qui propose des valeurs de quantiles à haute résolution spatiale sur tout le territoire national.





# Chapitre 7

## Liens avec les dispositifs nationaux

Nous concluons ce rapport par une mise en perspective par rapport aux outils opérationnels disponibles à l'échelle nationale pour la connaissance des crues. Sur le volet anticipation des crues, nous comparons les performances de la nouvelle structure du modèle SMASH avec la version de SMASH telle qu'elle est mise en œuvre en temps réel dans le dispositif Vigicrues Flash opéré par le Schapi. Sur le volet prédétermination des crues, nous comparons les quantiles issus des modèles régionalisés, développés dans la partie 6.3 avec ceux fournis par la méthode SHYREG.

### 7.1 Vers une amélioration de Vigicrues Flash

Les travaux menés sur la structure du modèle SMASH au pas de temps journalier (Colleoni, 2020) et au pas de temps horaire dans le cadre du projet HYDRODEMO ont permis une nette amélioration des performances avec ce modèle. Il est apparu intéressant de comparer cette nouvelle structure de modèle, à 8 paramètres, avec la structure plus simple actuellement mise en œuvre dans Vigicrues Flash, c'est-à-dire la structure de modèle SMASH à deux paramètres  $cp$  et  $ctr$ , notée SMASH VF. La comparaison est effectuée sur l'échantillon des 55 bassins versants du projet. Elle a été menée en **validation** uniquement et non avec les modèles régionalisés. Les régionalisations mises en œuvre sur les deux versions diffèrent en effet de manière notable. La régionalisation des paramètres de la version temps réel de Vigicrues Flash a été élaborée à l'échelle de la France entière par hydro-écorégions via les paramètres médians, après calage du paramètre de production  $cp$  sur 1194 stations hydrométriques, le paramètre de transfert  $ctr$  ayant été fixé à la valeur de 140 mm (Demargne *et al.*, 2019). La régionalisation de la version SMASH v2.CemN dans le cadre du projet HYDRODEMO a, quant à elle, été menée localement par transfert du jeu de paramètres du bassin donneur maximisant les performances globales sur l'échantillon de 55 bassins versants nord-alpins. Cette stratégie de régionalisation est sensible à l'échantillonnage et questionne sa robustesse. On a constaté qu'un unique jeu de paramètre ne peut être représentatif de comportements particuliers (notamment pour les bassins versants dont les coefficients d'écoulement sont très faibles).

Afin de s'approcher des conditions de calage et d'utilisation temps réel de Vigicrues Flash, les structures de modèle ont été comparées au pas de temps 15 minutes à l'aide des forçages Antilope 60 minutes J+1 désagrégées au pas de temps 15 minutes. La calage a été conduit de manière spatialement uniforme en utilisant le critère de Nash comme fonction objectif. Les résultats en terme de performances en validation sur les bassins jaugés des Alpes du Nord (figure 7.1) permettent d'appréhender tout l'intérêt de la structure du modèle dans sa version SMASH v2.CemN qui, comparée à la version à 2 paramètres SMASH VF, est augmentée d'un module neige, d'un triple transfert au sein du pixel et d'un terme d'échange, le tout permettant une meilleure restitution des débits.

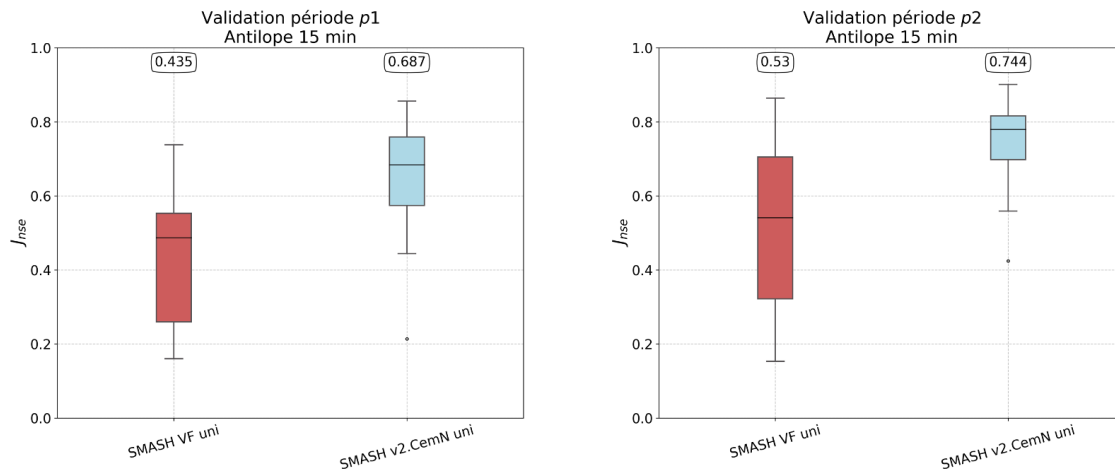


FIGURE 7.1 – Comparaison des performances globales en terme de Nash-Sutcliffe sur les périodes  $p1$  (gauche) et  $p2$  (droite) de validation après un calage spatialement uniforme. SMASH VF uni représente le modèle SMASH avec la structure Vigierues Flash (à 2 paramètres  $cp$  et  $ctr$ ). SMASH v2.CemN représente le modèle SMASH avec la structure à 8 paramètres issue de la partie 5.3.

Cette meilleure restitution des débits est corroborée par l'examen des hydrogrammes, en particulier pour les cours d'eau dont le régime hydrologique possède une forte composante nivale. Les hydrogrammes calculés sur la Durance à Briançon montrent ainsi que SMASH VF modélise des crues non justifiées, en réponse à des épisodes neigeux, ce qui n'est plus le cas avec SMASH v2.CemN dont l'hydrogramme modélisé correspond beaucoup mieux à l'hydrogramme observé (figure 7.2). Les difficultés de la modélisation SMASH VF sur les cours d'eau à composante nivale permettent de comprendre la non éligibilité actuelle de ces bassins au service Vigierues Flash.

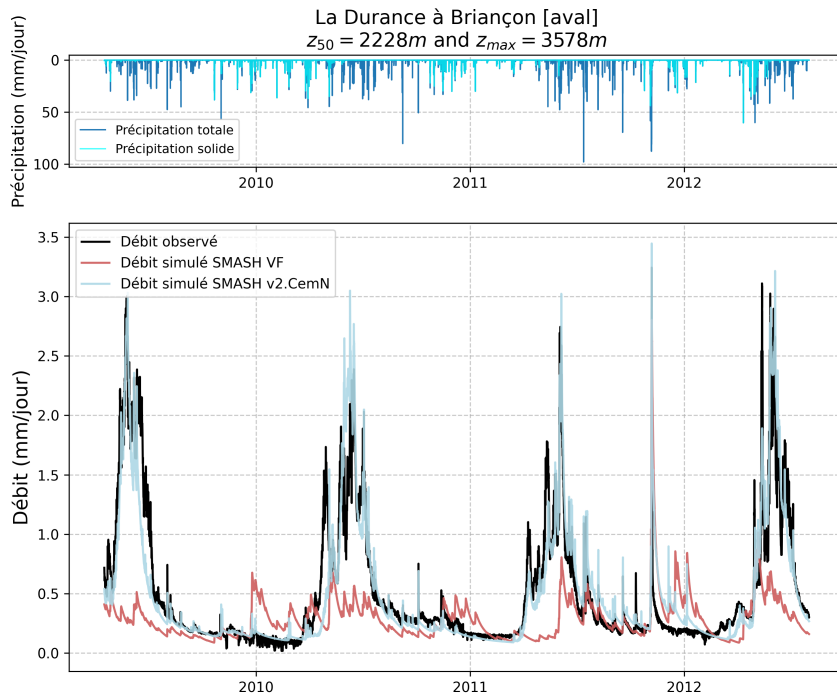


FIGURE 7.2 – Hydrogrammes observé et modélisé de La Durance à Briançon [aval].

On attire l'attention sur le fait que cette version SMASH v2.CemN élaborée et testée dans le cadre du projet HYDRODEMO est toujours en cours de développement et n'est en aucun cas la nouvelle structure du modèle qui est ou qui sera adoptée dans le service opérationnel Vigicrues Flash. Ces résultats participent à l'amélioration du modèle SMASH. Ils ont permis de proposer et de tester de nouveaux opérateurs dans la structure du modèle afin de répondre à la spécificité des régimes hydrologiques des bassins pluviaux-niveaux des Alpes du Nord. Ces nouveaux opérateurs vont être testés de manière plus générale dans le cadre des travaux menés pour le Schapi, sur un large échantillon de bassins versants du territoire national pour s'assurer de leur transposabilité en dehors du domaine nord-alpin. On s'assurera que le module neige est bien adapté pour la modélisation des cours d'eau de montagne d'autres massifs et que l'amélioration du transfert au pixel et l'introduction de flux non conservatifs permettent de gains de modélisation sur l'ensemble des cours d'eau du territoire national. Un travail de régionalisation à l'échelle nationale sera ensuite nécessaire avant d'envisager une mise en œuvre dans un code de calcul opérationnel.

## 7.2 Examen des performances de la méthode SHYREG sur les Alpes du Nord

La méthode SHYREG (Organde *et al.*, 2013 ; Arnaud *et al.*, 2016) développée par Inrae peut répondre au besoin de connaissances sur les grandeurs statistiques de crues, cette étude ayant montré les limitations des quantiles estimés à partir de la régionalisation des modèles SMASH et MORDOR-SD (voir section 6.3). La méthode SHYREG est issue de la régionalisation de la méthode SHYPRE (Arnaud et Lavabre, 2000) qui permet de générer de très longues chroniques de hyétogrammes et d'hydrogrammes afin de déterminer des quantiles de pluie, de débit et de cote du plan d'eau d'un barrage. La méthode SHYREG permet de constituer une base de données des quantiles de pluie et de débit de la région étudiée à une résolution spatiale de 1 km<sup>2</sup>. Les quantiles de pluie SHYREG de la France métropolitaine sont disponibles auprès de Météo-France. Les quantiles de débit SHYREG de la France métropolitaine sont disponibles sur un peu plus de 142 000 exutoires contrôlant des surfaces de bassin versant comprises entre 5 et 5000 km<sup>2</sup> et répartis de façon homogène sur le territoire de la France métropolitaine. Ces quantiles de débit SHYREG sont consultables sur le site web <https://shyreg.recover.inrae.fr/> mis en place par INRAE Aix-en-Provence pour les services de l'Etat, les collectivités territoriales et les bureaux d'études ayant l'agrément pour le « Contrôle des ouvrages hydrauliques ».

La méthode SHYREG débit a été calée de manière à reproduire au mieux les quantiles de crue de périodes de retour 2, 5 et 10 ans calculés sur plus de 1900 stations hydrométriques en France métropolitaine. Les superficies des bassins versants utilisés pour régionaliser la méthode SHYREG-débit en France métropolitaine varient de 2 à 10000 km<sup>2</sup> mais la majorité d'entre elles sont comprises entre 5 à 5000 km<sup>2</sup> ; de ce fait, l'application de la méthode SHYREG à des bassins versants de superficie sortant de la gamme [5, 5000] km<sup>2</sup> peut dégrader la qualité de ses résultats. Par ailleurs, la méthode reposant sur une approche régionale des débits naturels de bassins versants ruraux, elle ne prend pas en compte les éventuelles spécificités significatives à l'échelle du bassin versant telles que les karsts, les aménagements hydrauliques, les champs d'expansion des crues, le régime nival, et n'est pas adaptée aux bassins versants très fortement urbanisés.

Malgré ces réserves, les quantiles SHYREG apparaissent globalement pertinents sur les bassins étudiés même si l'on peut noter quelques sous-estimations (l'Herbasse, la Galaure, le Foron) et sur-estimations (le Redon, le ruisseau de Bornette, l'Albanne, la Ribière, la Jonche). Les critères de Nash

sont en effet du même ordre de grandeur que ceux obtenus avec les quantiles issus des modèles SMASH et MORDOR-SD calés : 0.93, 0.89 et 0.80 pour les quantiles 2 ans, 5 ans et 10 ans respectivement (figure 7.3). Il est important de noter que seulement 8 bassins de l'échantillon de bassins HYDRODEMO n'appartiennent pas à l'échantillon des 1935 bassins retenus pour le calage de la méthode SHYREG sur le territoire national. La figure 7.4 permet d'analyser la restitution des quantiles par la méthode SHYREG sur les bassins HYDRODEMO en distinguant les bassins selon qu'ils ont été utilisés ou non pour le calage de la méthode SHYREG.

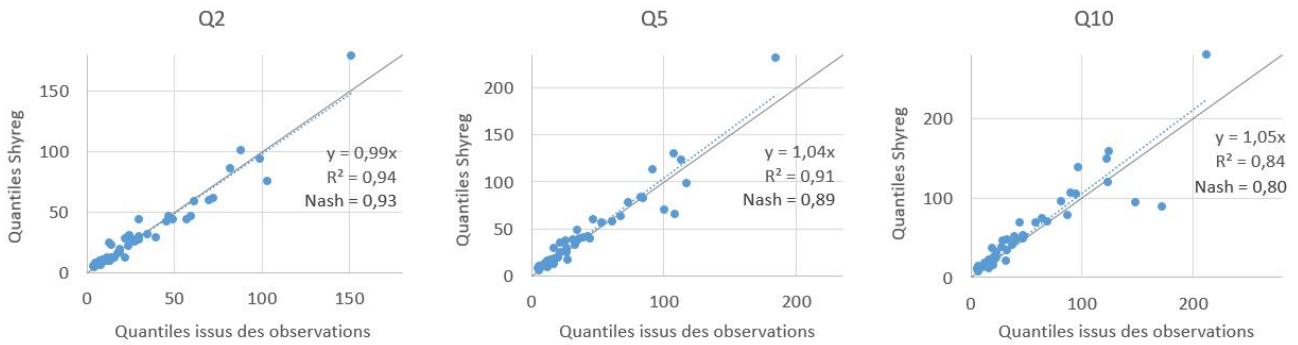


FIGURE 7.3 – Confrontation des quantiles observés et modélisés pour les périodes de retour 2 ans (à gauche), 5 ans (au centre) et 10 ans (à droite). Modélisations effectuées avec la méthode SHYREG.

Sur les bassins jaugés des Alpes du Nord analysés ici, la méthode SHYREG reproduit les quantiles fréquents correctement ( $R^2 > 0.8$ ; Nash  $> 0.8$ ) et sans biais (pente de la droite de régression proche de 1). Sur les 8 bassins n'ayant pas servi au calage de la méthode SHYREG, on note une reproduction toujours correcte des quantiles ( $R^2 > 0.9$ , similaire à celle obtenue avec les modèles régionalisés) mais avec une tendance à la surestimation qui s'accroît avec la période de retour (pente  $> 1$ ) entraînant une dégradation du critère de Nash-Sutcliffe pour la fréquence décennale.

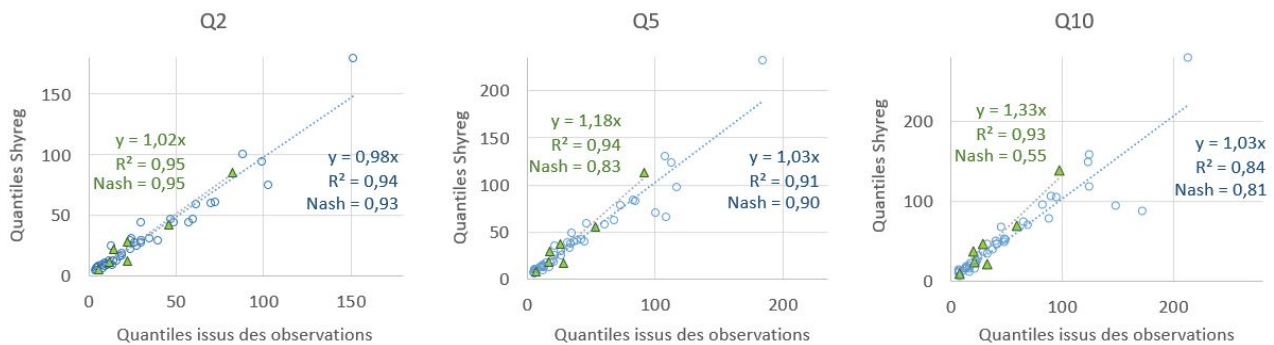


FIGURE 7.4 – confrontation des quantiles observés et modélisés pour les périodes de retour 2 ans (à gauche), 5 ans (au centre) et 10 ans (à droite). Modélisations effectuées avec la méthode SHYREG. Cercles : bassins HYDRODEMO ayant servi au calage de la méthode SHYREG, triangles : bassins HYDRODEMO n'appartenant pas à l'échantillon de calage de la méthode SHYREG.

Au final, les performances obtenues en restitution des quantiles par la méthode SHYREG sont satisfaisantes, meilleures que celles obtenues avec les modèles régionalisés. La méthode présente l'avantage de fournir des quantiles de crue à haute résolution spatiale comme le montre l'extrait cartographique réalisé sur la région de Grenoble (figure 7.5).

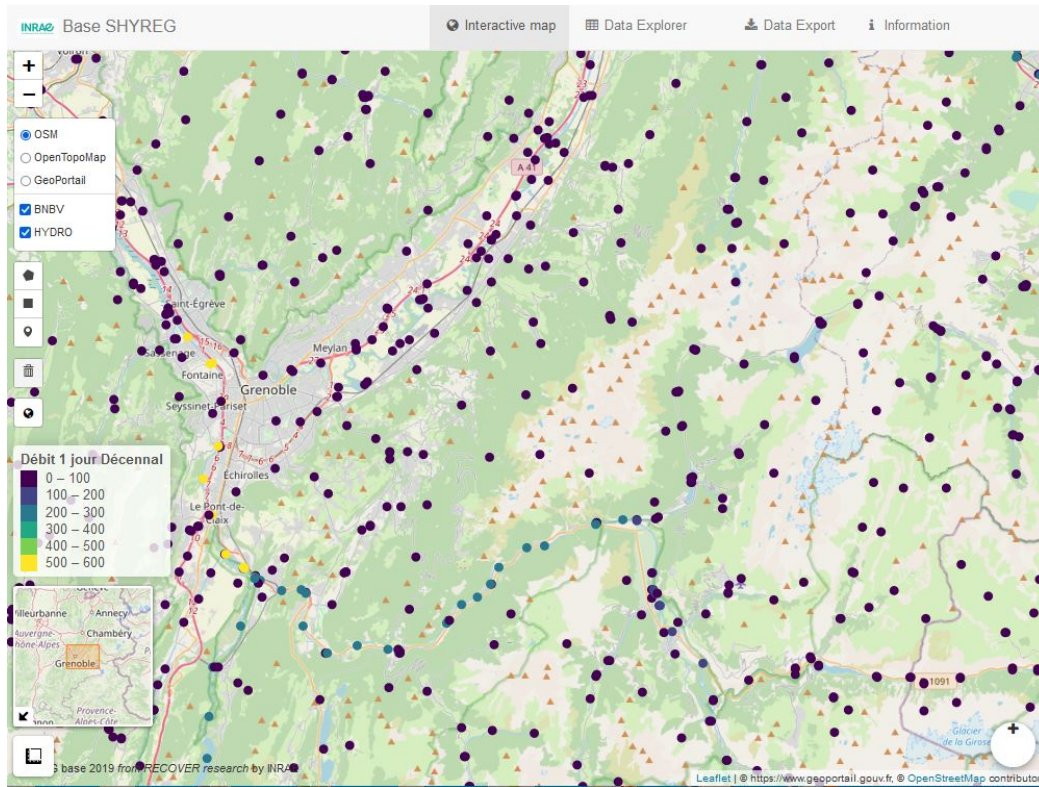


FIGURE 7.5 – Capture écran de la base SHYREG consultable en ligne, zoom sur la région grenobloise montrant 534 exutoires (ronds bleus à jaunes, selon la valeur du débit journalier décennal) où la méthode SHYREG est mise en œuvre.

A l'échelle nationale, la méthode SHYREG a été appliquée sur les 142 632 exutoires, jaugés et non jaugés, de la Base nationale des bassins versants (BNBV) qui sert de référence à de nombreux outils (Shyreg, Vigicrues Flash, Loieau, ...). Sur les départements des Alpes du Nord, cela correspond à 1714 tronçons sur l'Isère, 1298 tronçons sur la Savoie et 1036 tronçons sur la Haute-Savoie. Cette haute résolution spatiale permet de fournir des valeurs statistiques de crues sur de nombreux cours d'eau d'intérêt, comme les cours d'eau non jaugés du Massif de Belledonne. On a par exemple accès aux quantiles de crue sur 6 points de calcul sur le linéaire du ruisseau de Vorz : à 5.1, 18.2, 22.2, 32.4, 33.5 et 33.8 km<sup>2</sup> (figure 7.6).

Sur chacun des exutoires de la BNBV, la méthode SHYREG fournit les quantiles de crue calculés pour différentes durées (débits de pointe et journaliers et débits en 1h, 2h, ... 72h) et pour différentes périodes de retour (2, 5, ... 1000 ans). Ces quantiles sont téléchargeables sous forme de fiches. On peut consulter en Annexe celle générée pour le Domenon juste avant sa confluence avec l'Isère. Outre les quantiles, la fiche fournit :

- les bornes de l'intervalle de confiance à 80% associé à chaque quantile,
- les éventuelles contre-indications à la mise en œuvre de la méthode SHYREG sur la station résumées en codes de confiance associés à différents critères (neige, karst, influence des barrages, zones d'expansion des crues, influence du débit de base...),
- des données cartographiques : MNT, hydrographie, évolution de l'occupation du sol,
- la cartographie des paramètres de la méthode SHYREG pour le bassin versant considéré.



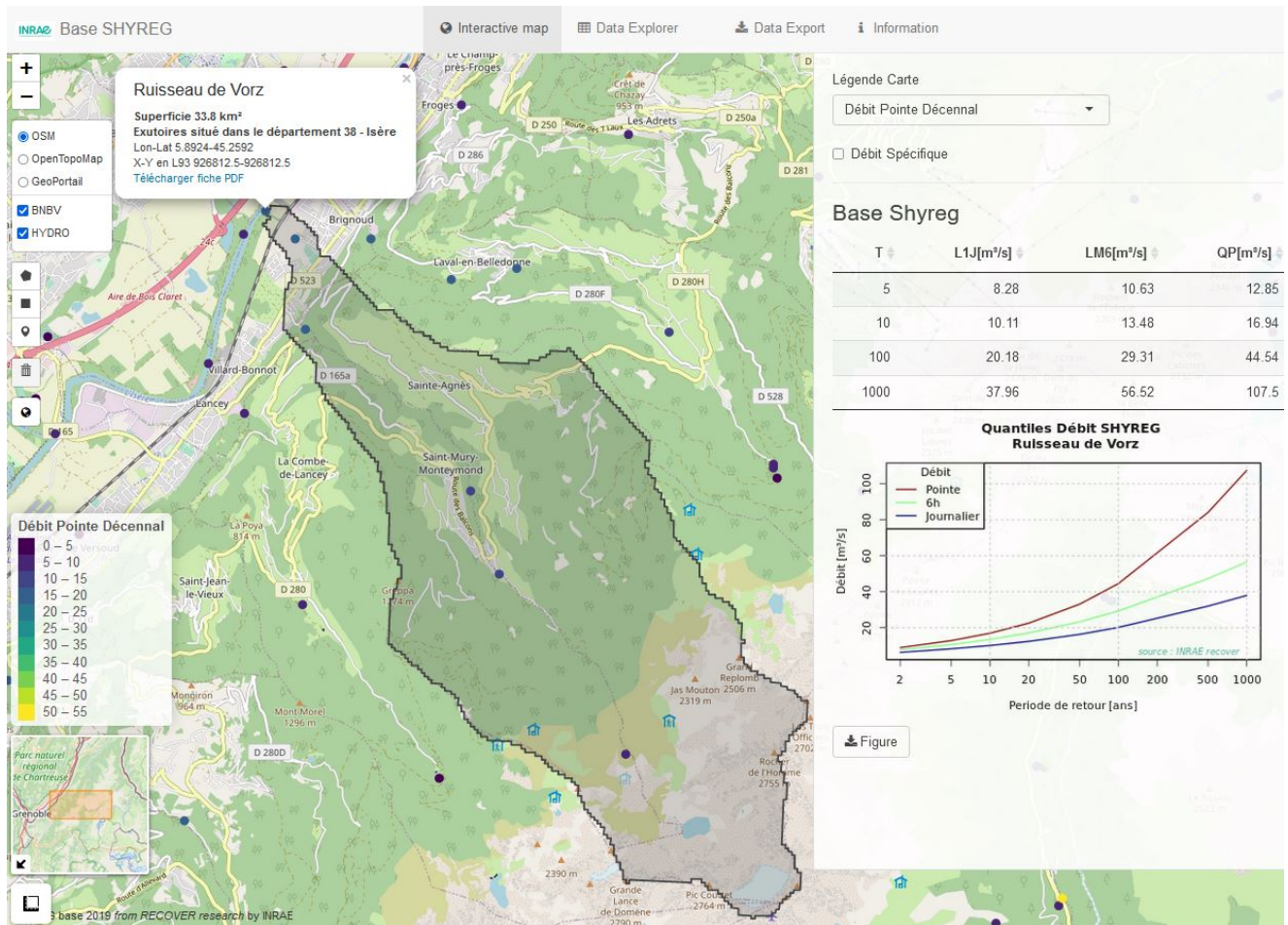


FIGURE 7.6 – Extrait de la base SHYREG sur le Ruisseau de Vorz avec aperçu de quelques valeurs de quantiles calculées au niveau de la confluence avec l'Isère ( $S = 33.8 \text{ km}^2$ ) et localisation des 5 exutoires de calcul situés en amont (à 5.1, 18.2, 22.2, 32.4 et 33.5 km<sup>2</sup>) où les quantiles SHYREG sont également disponibles.

# Conclusion

Les objectifs de l'action 4 du projet HYDRODEMO étaient de caractériser l'hydrologie de bassins versants instrumentés, puis de définir une méthodologie de transposition aux autres bassins versants des Alpes du Nord.

Le projet a permis de répondre au premier de ces objectifs. Il a permis d'adapter la structure du modèle SMASH aux bassins alpins et donc de mieux caractériser l'hydrologie des ces petits bassins. Ces adaptations ont conduit à une amélioration des performances du modèle en reconstitution de crues. Ces améliorations constatées sur l'échantillon restreint des bassins versants du projet HYDRODEMO demandent à être confirmées sur un plus large échantillon de bassins avant d'envisager des perspectives en termes d'évolution du dispositif Vigicrues Flash. Le modèle MORDOR-SD, appliqué habituellement à une échelle journalière et pour de plus grands bassins ( $>200 \text{ km}^2$ ) montre également des performances très satisfaisantes sur ces petits bassins versants torrentiels.

Un premier travail de transposition des modèles MORDOR-SD et SMASH v2.CemN sur des bassins non instrumentés a également été réalisé en testant 3 méthodes de régionalisation différentes. Ce travail montre des résultats intéressants - il a été possible de discriminer les méthodes de régionalisation entre elles - mais perfectibles pour une grande partie des bassins versants du projet et en particulier ceux à fonctionnement atypique caractérisés par un coefficient de ruissellement très faible. Les résultats obtenus en régionalisation se sont révélés décevants dans la modélisation des extrêmes, ce qui rend pour l'instant délicate l'utilisation des versions régionalisées des modèles en prédétermination des quantiles de crues. Ce travail de transposition du modèle demande donc à être approfondi. Nous avons pu constater que la méthode SHYREG se révèle une alternative pertinente pour la connaissance des valeurs statistiques de crue sur les bassins des Alpes du Nord, se calant sans biais sur les bassins instrumentés et reproduisant correctement les quantiles des bassins n'ayant pas servi à son calage.

La poursuite des travaux de transposition au non jaugé va s'insérer, pour le modèle SMASH, dans les actions de recherche menée par INRAE Aix (ANR Muffins, projet Explore2, convention pluri-annuelle SNRH-INRAE) dans lesquelles seront poursuivies les travaux sur la paramétrisation, les calages uniforme et distribué du modèle SMASH et sa régionalisation. Seront en particulier utilisées les possibilités de calage distribué des paramètres, contraint par des caractéristiques physiographiques (pente, altitude occupation du sol, ...) offertes par l'algorithme de calage variationnel implémenté dans SMASH. Ce calage contraint, en cours de développement, permet d'effectuer simultanément les étapes de calage et régionalisation. Il représente une solution potentielle pour contourner les difficultés posées par l'étape de régionalisation associée à un calage uniforme des paramètres que nous avons constatées dans le cadre de ce travail.





# Annexes

Fiche SHYREG pour le Domenon aval



Identifiant : RH1935

Surface = 47.2 km<sup>2</sup>

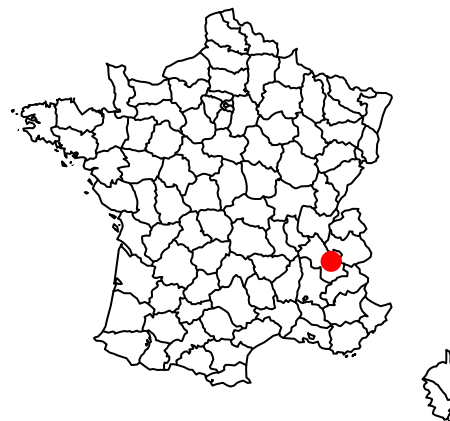
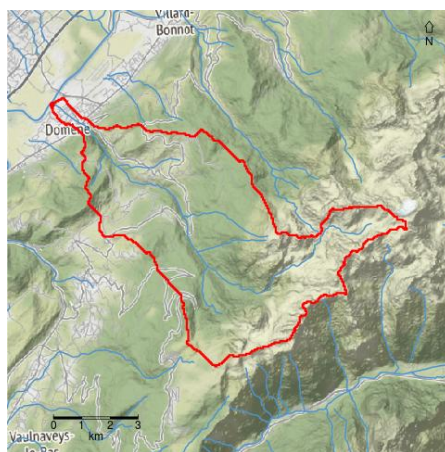
X (L93) = 921862 m

Y (L93) = 6460462 m

Ruisseau du Domenon

Quantiles SHYREG – 2019

Produit par Irstea avec le soutien de la DGPR.  
Usage soumis aux conditions d'utilisation.  
Lire la notice explicative de la methode et ses limites.

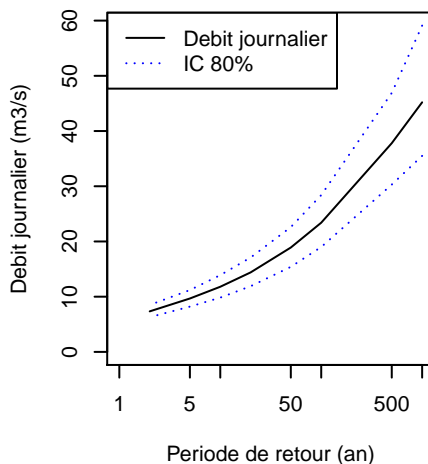
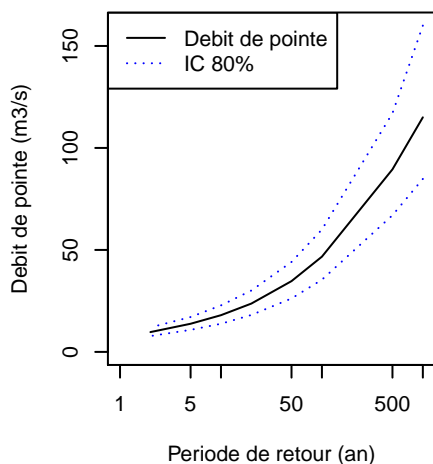


### Debits (m3/s) – Durees (h) – Periode de retour (annee)

	Pointe	Jour	1h	2h	3h	4h	6h	12h	24h	48h	72h
<b>T= 1000</b>	115	45.2	89.7	83.6	76.3	71.1	64.8	55.9	47.7	33.8	25.4
<b>T= 500</b>	89.5	37.8	72.6	68.3	63	59	53.8	46.6	39.8	28.4	21.6
<b>T= 100</b>	46.7	23.4	41.2	39.3	37.2	35.4	32.7	28.5	24.6	18.1	14.3
<b>T= 50</b>	34.7	18.9	31.4	30.2	28.9	27.7	25.8	22.8	19.8	15	12.1
<b>T= 20</b>	23.7	14.4	21.9	21.3	20.6	20	18.9	17	15	11.8	9.87
<b>T= 10</b>	18	11.8	16.8	16.4	16	15.6	15	13.6	12.3	9.97	8.45
<b>T= 5</b>	13.8	9.67	13	12.8	12.5	12.3	11.9	11	10	8.36	7.17
<b>T= 2</b>	9.72	7.34	9.26	9.15	9.02	8.9	8.67	8.17	7.58	6.47	5.61

### Bornes de l'intervalle de confiance a 80 %

	Pointe	Jour	1h	2h	3h	4h	6h	12h	24h	48h	72h
<b>T= 1000</b>	84.8 / 160	35.5 / 59.1	66.3 / 124	61.9 / 116	56.7 / 105	53 / 97.9	48.5 / 88.8	42.5 / 75.4	37.5 / 62.4	28.2 / 41.4	22.4 / 29
<b>T= 500</b>	67 / 117	30.3 / 46.9	54.5 / 94.6	51.4 / 88.8	47.6 / 81.7	44.7 / 76.4	41 / 69.4	36.1 / 59.3	31.9 / 49.3	24.2 / 33.3	19.5 / 23.9
<b>T= 100</b>	35.4 / 60	19 / 28.4	31.3 / 52.9	29.9 / 50.3	28.4 / 47.5	27.1 / 45.1	25.2 / 41.5	22.4 / 35.6	20 / 29.9	15.7 / 20.7	13.2 / 15.4
<b>T= 50</b>	26.2 / 44.1	15.4 / 22.6	23.8 / 39.8	23 / 38.2	22.1 / 36.5	21.2 / 34.9	19.9 / 32.3	17.9 / 28.1	16.2 / 23.7	13.1 / 16.8	11.3 / 12.7
<b>T= 20</b>	18.1 / 30.1	11.9 / 17.1	16.8 / 27.7	16.4 / 26.9	15.9 / 25.9	15.5 / 25.1	14.7 / 23.6	13.5 / 20.9	12.4 / 17.8	10.5 / 13	9.41 / 10.1
<b>T= 10</b>	13.8 / 22.8	9.83 / 13.9	12.9 / 21.2	12.7 / 20.7	12.4 / 20.1	12.1 / 19.5	11.8 / 18.7	10.9 / 16.6	10.2 / 14.5	8.96 / 10.9	8.14 / 8.5
<b>T= 5</b>	10.8 / 17.1	8.2 / 11.2	10.2 / 16.1	10.1 / 15.8	9.9 / 15.4	9.78 / 15.1	9.52 / 14.5	8.98 / 13.2	8.48 / 11.6	7.63 / 9.03	7 / 7.17
<b>T= 2</b>	7.76 / 12	6.29 / 8.5	7.42 / 11.4	7.35 / 11.2	7.27 / 11	7.19 / 10.9	7.05 / 10.5	6.76 / 9.77	6.5 / 8.77	5.92 / 7	5.46 / 5.64



### Codes de confiance

% du bassin influence par un barrage	0
% du bassin hors France	0
% du bassin en zone karstique	0
% d'apport neigeux	36
Rapport QJ2/QA	5.9
Zone plate	0.75

Pas de contre indication	Bassin faiblement influence
Bassin fortement influence	Surement hors application



Identifiant : RH1935

Surface = 47.2 km<sup>2</sup>

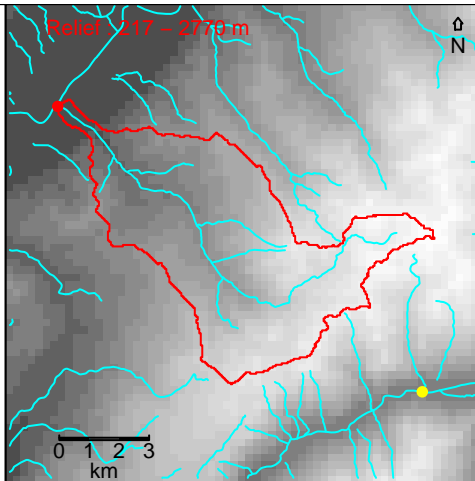
X (L93) = 921862 m

Y (L93) = 6460462 m

Ruisseau du Domenon

Quantiles SHYREG – 2019

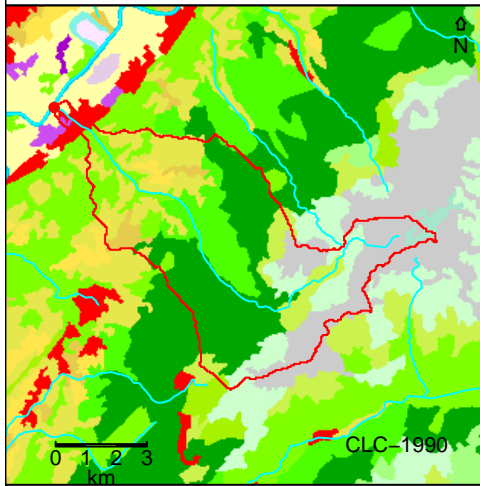
Produit par Irstea avec le soutien de la DGPR.  
Usage soumis aux conditions d'utilisation.  
Lire la notice explicative de la methode et ses limites.



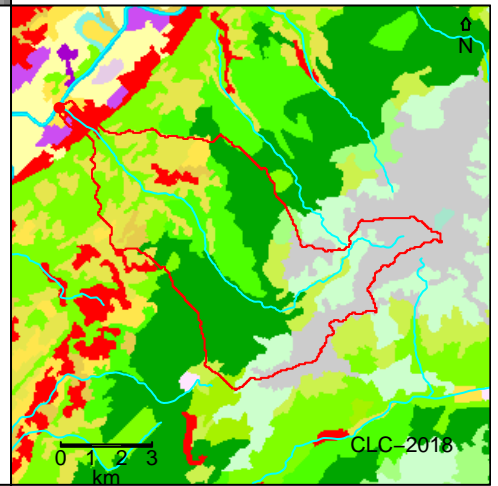
Codes de confiance

% du bassin influence par un barrage	0
% du bassin hors France	0
% du bassin en zone karstique	0
% d'apport neigeux	36
Rapport QJ2/QA	5.9
Zone plate	0.75

Pas de contre indication	Bassin faiblement influence
Bassin fortement influence	Surement hors application

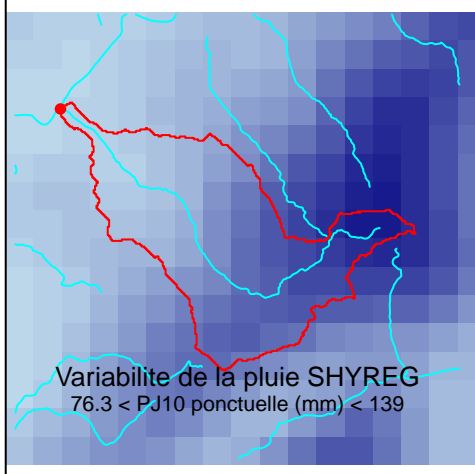


- |                             |                        |
|-----------------------------|------------------------|
| ■ Urbain continu            | ■ Coniferes            |
| ■ Urbain discontinu         | ■ Foret mixte          |
| ■ ZI ou ZAC                 | ■ Prairies naturelles  |
| ■ Reseau routier            | ■ Landes               |
| ■ Port                      | ■ Vegetation aride     |
| ■ Aeroport                  | ■ Vegetation arbustive |
| ■ Mine                      | ■ Plages dunes sable   |
| ■ Decharge                  | ■ Roches nues          |
| ■ Construction              | ■ Vegetation eparse    |
| ■ ZU verte                  | ■ Incendiee            |
| ■ Sport                     | ■ Glaciers et neiges   |
| ■ Terre arable non irriguee | ■ Marais interieurs    |
| ■ Terre arable irriguee     | ■ Marais de tourbe     |
| ■ Rizieres                  | ■ Marais salant        |
| ■ Vignes                    | ■ Salins               |
| ■ Vergers                   | ■ Plan intertidaux     |
| ■ Oliveraies                | ■ Cours d'eau          |
| ■ Paturages                 | ■ Bras d'eau           |
| ■ Multi-cultures            | ■ Lagons cotiers       |
| ■ Vegetation agricole       | ■ Estuaires            |
| ■ Agro-foresterie           | ■ Mers et oceans       |
| ■ Feuillus                  |                        |



Parametres moyens du generateur de pluie

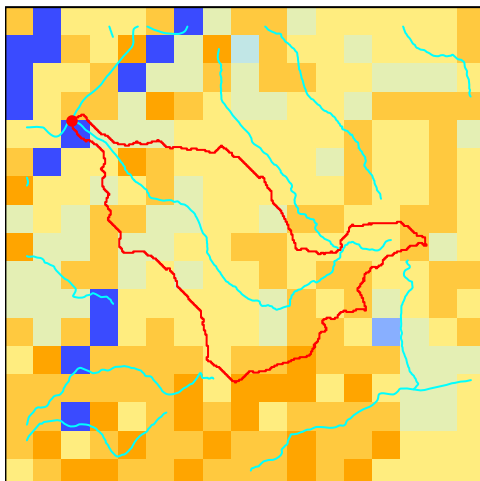
	Hiver	Ete
NE	7.44	10.1
PJMAX (mm)	31.2	35.5
DTOT (jour)	2.69	2.12
RX	0.373	0.456



Il y a 0 station(s) jaugee(s) dans le bassin

Les cinq stations les plus proches sont :

- \* W1410010 (5720 km<sup>2</sup>) a 8.21 km
- \* W2832020 (3550 km<sup>2</sup>) a 10.58 km
- \* W3015010 (63.5 km<sup>2</sup>) a 10.84 km
- \* W2764010 (1000 km<sup>2</sup>) a 15.45 km
- \* W3005010 (33 km<sup>2</sup>) a 16.38 km



A moyen = 369 mm

S0/A moyen Annuel = 0.23

Parametre S0/A

■ 0.9 -> 1	■ 0.4 -> 0.5
■ 0.8 -> 0.9	■ 0.3 -> 0.4
■ 0.7 -> 0.8	■ 0.2 -> 0.3
■ 0.6 -> 0.7	■ 0.1 -> 0.2
■ 0.5 -> 0.6	■ 0 -> 0.1

## Bibliographie

- ARNAUD, P., CANTET, P. et AUBERT, Y. (2016). Relevance of an at-site flood frequency analysis method for extreme events based on stochastic simulation of hourly rainfall. *Hydrological Sciences Journal*, 61(1) :36–49.
- ARNAUD, P. et LAVABRE, J. (2000). La modélisation stochastique des pluies horaires et leur transformation en débits pour la prédétermination des crues. *Revue des Sciences de l'Eau / Journal of Water Science*, 13(4) :441–462.
- CHAMPEAUX, J.-L., DUPUY, P., LAURANTIN, O., SOULAN, I., TABARY, P. et SOUBEYROUX, J.-M. (2009). Les mesures de précipitations et l'estimation des lames d'eau à météo-france : état de l'art et perspectives. *La Houille Blanche*, 5 :28–34.
- COLLEONI, F. (2020). Prise en compte de la modélisation nivale dans la modélisation hydrologique des crues. Stage de fin d'étude.
- DEMARGNE, J., ORGANDE, D., FINE, J.-A. et FOUCHIER, C. (2019). Calage de la modélisation hydrologique au pas de temps infra-horaire pour le service d'avertissement vigicrues flash. Irstea.
- DEMARGNE, J., ORGANDE, D., FINE, J.-A. et FOUCHIER, C. (2020). Tests de l'algorithme de calage pas à pas avec la modélisation hydrologique grdv2 à deux paramètres au pas de temps infra-horaire pour le service d'avertissement vigicrues flash. Irstea.
- DONALDSON, R. J., DYER, R. M. et KRAUS, M. J. (1975). An objective evaluator of techniques for predicting severe weather events. *In Preprints of the Ninth Conference on Severe Local Storms*, pages 321–326.
- EDIJATNO, N. et MICHEL, C. (1989). Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, 2 :113–121.
- EVIN, G. et PITON, G. (2020). Analyse bivariée des liens entre magnitude et durée des crues en zones alpine et pyrénéenne. Rapport de recherche. INRAE; DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques - Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire), <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02509705>.
- FOLTON, N. et ARNAUD, P. (2020). Indicateurs sur la ressource en eau estimés par une modélisation pluie-débit régionalisée : la base de données web loieau. *La Houille Blanche*, 3 :22 – 29.
- GARAVAGLIA, F., GOTTARDI, F. et LE LAY, M. (2015). Évolution du modèle hydrologique MORDOR. Synthèse des développements et proposition d'une nouvelle formulation. Rapport technique EDF-DTG : H-44200965-2015-000109, EDF, Centre Hydrométéorologique Alpes.
- GARAVAGLIA, F. et LE LAY, M. (2017). Stratégies de calage MORDOR SD. Note technique, EDF, Centre Hydrométéorologique Alpes.
- GARAVAGLIA, F., LE LAY, M., GOTTARDI, F., GARÇON, R., GAILHARD, J., PAQUET, E. et MATHEVET, T. (2017). 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.
- GARÇON, R. (1996). 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*, 5 :71–76.

- GOTTARDI, F., OBLED, C., GAILHARD, J. et PAQUET, E. (2012). Statistical reanalysis of precipitation fields based on ground network data and weather patterns : Application over French mountains. *Journal of Hydrology*, 432-433 :154–167.
- GRAFF, B. (2004). Prédétermination des débits de crue des petits bassins versants torrentiels. Thèse de doctorat, Montpellier 2.
- GUPTA, H., KLING, H., YILMAZ, K. et MARTINEZ, G. (2009a). Decomposition of the mean squared error and nse performance criteria : Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1) :80–91.
- GUPTA, H. V., KLING, H., YILMAZ, K. K. et MARTINEZ, G. F. (2009b). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria : Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1) :80–91.
- HASCOET, L. et PASCUAL, V. (2013). The Tapenade Automatic Differentiation tool : principles, model, and specification. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 39(3).
- HE, Y., BÀRDOSSY, A. et ZEHE, E. (2011). A review of regionalisation for continuous streamflow simulation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(11) :3539–3553.
- JAVELLE, P., ORGANDE, D., DEMARGNE, J., SAINT-MARTIN, C., DE SAINT-AUBIN, C., GARANDEAU, L. et JANET, B. (2016). Setting up a french national flash flood warning system for ungauged catchments based on the AIGA method. In *E3S Web of Conferences*, volume 7.
- JAY-ALLEMAND, M., JAVELLE, P., GEJADZE, I., ARNAUD, P., MALATERRE, P.-O., FINE, J.-A. et ORGANDE, D. (2019). On the potential of variational calibration for a fully distributed hydrological model : application on a mediterranean catchment. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2019 :1–24.
- MARCHI, L., BORGA, M., PRECISO, E. et GAUME, E. (2010). Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. *Journal of Hydrology*, 394(1) :118–133.
- MARDHEL, V. (2006). Carte de vulnérabilité intrinsèque simplifiée des eaux souterraines de la région Aquitaine. Rapport technique BRGM/RP-55311-FR, BRGM.
- MAS, A. et EVIN, G. (2021). HYDRODEMO - Action 4 : Application du modèle hydrologique MORDOR-SD sur bassins jaugés et non-jaugés.
- MAS, A., MOREL, M., ORILLARD, L., REVERDY, A., BLANCHET, J., PITON, G. et EVIN, G. (2022). Projet HYDRODEMO Évaluation de l'aléa torrentiel dans les petits bassins versants des Alpes du Nord : action 1 : État des lieux et recueil de l'information disponible concernant l'aléa torrentiel. INRAE UR-ETNA ; IGE, Grenoble, France, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03574748>.
- MATHYS, N. (2010). Prédétermination des crues sur les bassins versants torrentiels : faisabilité d'une synthèse hydrologique régionale fondée sur la prise en compte de facteurs géographiques locaux. Rapport technique, Cemagref Grenoble, UR ETNA.
- MEYZENQ, C. (1984). A propos de la limite Alpes du Nord - Alpes du Sud. limites, pays de marge et organisation spatiale en montagne, évolution des concepts. *Revue de géographie alpine*, 72 :241–251.
- NASH, J. et SUTCLIFFE, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models, part i - a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3) :282–290.

- NERI, M., PARAJKA, J. et TOTH, E. (2020). Importance of the informative content in the study area when regionalising rainfall-runoff model parameters : the role of nested catchments and gauging station density. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(11) :5149–5171.
- OBLED, C., ZIN, I., FINET, M. T. et MARTY, R. (2005). Etude de la réponse hydrologique du Sonnant d’Uriage : Essai de transfert à des bassins voisins. Diagnostic et proposition de réseau pluviométrique sur le massif de Belledonne. LTHE, Grenoble.
- ORGANDE, D. (2018). Développement dans le modèle hydrologique grd de la modélisation des écoulements lents. Rapport technique, Hydris Hydrologie.
- ORGANDE, D., ARNAUD, P., FINE, J.-A., FOUCHIER, C., FOLTON, N. et LAVABRE, J. (2013). Régionalisation d’une méthode de prédétermination de crue sur l’ensemble du territoire français : la méthode shyreg. *Revue des sciences de l’eau / Journal of Water Science*, 26(1) :65–78.
- ODIN, L., ANDRÉASSIAN, V., PERRIN, C., MICHEL, C. et LE MOINE, N. (2008). Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments : A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resources Research*, 44(3).
- PERRIN, C., MICHEL, C. et ANDRÉASSIAN, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of hydrology*, 279(1-4) :275–289.
- RICHARD, D. et OBLED, C. (2001). Analyse critique de réseaux hydrométriques existants ; quels enseignements pour l’agglomération grenobloise ? Pôle grenoblois d’étude et de recherche pour la prévention des risques naturels.
- ROUHIER, L. (2018). *Régionalisation d’un modèle hydrologique distribué pour la modélisation de bassins non jaugés. Application aux vallées de la Loire et de la Durance*. Thèse de doctorat, Sorbonne Université.
- SCHAEFER, J. . (1975). The critical success index as an indicator of warning skill. *Weather and Forecasting*, 5(4) :570–575.
- VALERY, A. (2010). Modélisation précipitations ? débit sous influence nivale élaboration d’un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. Thèse de doctorat, AgroParisTech.
- YANG, X., MAGNUSSON, J., RIZZI, J. et XU, C.-Y. (2018). Runoff prediction in ungauged catchments in Norway : comparison of regionalization approaches. *Hydrology Research*, 49(2) :487–505.
- ZHU, C., BYRD, R. H., LU, P. et NOCEDAL, J. (1994). L-bfgs-b - fortran subroutines for large-scale bound constrained optimization. Rapport technique, ACM Trans. Math. Software.



**Centre Center Lyon-Grenoble - Auvergne-Rhône-Alpes**  
2 rue de la Papeterie BP 76,  
38 402 St-Martin-d'Hères - France

Rejoignez-nous sur :



<https://www.inrae.fr/centres/lyon-grenoble-auvergne-rhone-alpes>