



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 : Application du modèle hydrologique MORDOR-SD sur bassins jaugés et non-jaugés

Alexandre Mas¹ and Guillaume Evin¹

¹ *Univ. Grenoble Alpes, INRAE, UR ETNA, 38000, Grenoble, France*

10 février 2022



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 : Alexandre Mas et Guillaume Evin. 2021. *HYDRODEMO - Action 4 : Application du modèle hydrologique MORDOR-SD sur bassins jaugés et non-jaugés* [Rapport de recherche] INRAE - UR 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. Ces phénomènes torrentiels sont en effet parfois destructeurs car extrêmement chargés en matériau solide. 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.

L'action 4 du projet HYDRODEMO vise à caractériser le fonctionnement hydrologique des petits bassins versants torrentiels des Alpes du Nord au moyen d'outils de modélisation. Ce rapport présente les résultats des travaux menés à l'aide du modèle hydrologique MORDOR-SD. Le modèle a d'abord été calé sur un échantillon de 79 bassins versants jaugés des Alpes du Nord présentant une large palette de caractéristiques physico-climatiques. Les résultats confirment la capacité du modèle à produire des simulations de débit fiables sur la majorité des bassins. Une stratégie de régionalisation des paramètres du modèle a ensuite été mise en place pour pouvoir simuler les débits sur des bassins non jaugés. Plusieurs méthodes ont été comparées, et une approche combinant pré-détermination de certains paramètres et transfert uniforme d'un jeu optimal des paramètres restants a été sélectionnée.

A l'issue de ces travaux, on dispose d'un cadre de simulation pour les bassins versants non jaugés applicable sur une large zone géographique.

Table des matières

1	Introduction	5
2	Données et outils	5
2.1	Forçages météorologiques	5
2.2	Débits observés	6
2.3	Échantillon de bassins versants	6
2.4	Modèle hydrologique	9
3	Stratégie de calage de MORDOR-SD	10
3.1	Choix des paramètres calés	10
3.2	Correction du bilan hydrologique	11
3.3	Bassins à contribution glaciaire	11
3.4	Périodes et critères de calage	11
4	Résultats des calages	13
4.1	Correction du bilan hydrologique - calage de <i>csbv</i>	13
4.2	Expérience de calage - validation	13
4.2.1	Paramétrisation du modèle	13
4.2.2	Performances du modèle	15
4.3	Calage sur périodes maximales	17
4.3.1	Performances du modèle	17
4.3.2	Distribution des paramètres	18
5	Extension en contexte non-jaugé	18
5.1	Objectif et principe d'évaluation	18
5.2	Paramétrisation du modèle	21
5.2.1	Paramètres fixés ou déterminés à partir de descripteurs de bassins	21
5.2.2	Calage des paramètres restants	23
5.2.3	Régionalisation des paramètres	23
5.3	Résultats	23
5.3.1	Calage	23
5.3.2	Validation	25
5.4	Discussion	27
5.4.1	Nombre de paramètres calés	27
5.4.2	Évaluation de la similitude entre bassins	28
5.5	Approche de régionalisation finalisée	30
5.6	Régionalisation avec les précipitations Comephore	31
6	Conclusions	33
	Annexes	35
A	Estimation du paramètre <i>csbv</i>	35
	Bibliographie	37

1 Introduction

Le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant peut être étudié selon différentes approches. La modélisation pluie-débit consiste à reproduire le débit à l'exutoire du bassin étudié en alimentant un modèle avec un certain nombre de forçages climatiques, en particulier les précipitations. Il existe aujourd'hui une multitude de modèles pluie-débit qui varient en terme de besoins en données d'entrée, de complexité de représentation des processus, et de paramétrisation.

La majorité de ces modèles utilisent des paramètres pour ajuster la représentation des processus hydrologiques au fonctionnement de chaque bassin. Les valeurs de ces paramètres sont généralement obtenues par une étape dite de calage au cours de laquelle on recourt à des outils d'optimisation afin que les débits simulés par le modèle soient les plus proches des débits observés à l'exutoire du bassin. Selon la complexité du modèle hydrologique et son degré de paramétrisation, cette étape peut nécessiter un travail important pour s'assurer de la cohérence des paramètres obtenus.

L'objectif de l'action 4 du projet HYDRODEMO est de mettre en place un cadre de modélisation hydrologique pour les petits bassins versants torrentiels des Alpes du Nord. Ces derniers sont caractérisés par un fonctionnement hydrologique particulier, avec des temps de réponse très courts et un transport solide potentiellement important. De plus, ils sont généralement localisés en montagne, dans des zones où l'installation et la maintenance d'équipement de mesure météorologiques ou hydrométriques sont complexes. Ce sont donc majoritairement des bassins non jaugés où les précipitations sont mal connues. Le travail effectué a donc été guidé par trois axes :

- Evaluer l'intérêt des forçages de précipitation à notre disposition pour la représentation du fonctionnement hydrologique des bassins cibles.
- Evaluer la capacité du modèle hydrologique MORDOR-SD à représenter adéquatement le fonctionnement hydrologique particulier des bassins jaugés du domaine.
- Mettre au point une approche de modélisation sur bassins non-jaugés avec MORDOR-SD.

La section 2 du rapport présente les aspects méthodologiques. La section 3 détaille la stratégie adoptée pour le calage du modèle MORDOR-SD. La section 4 présente les résultats de simulation sur les bassins jaugés. La section 5 développe les travaux effectués pour l'application de MORDOR-SD sur des bassins non-jaugés.

2 Données et outils

2.1 Forçages météorologiques

Les données utilisées dans le cadre du projet HYDRODEMO sont présentées en détail dans le rapport dédié à l'action 1 "État des lieux et recueil de l'information disponible concernant l'aléa torrentiel" (Mas *et al.*, 2021). On rappelle ici leurs caractéristiques principales. Le forçage de précipitation Comephore est une donnée horaire disponible sur une grille de 1 km² de 1997 à 2017. Les forçages de température et de précipitation Spazm sont des données journalières disponibles sur une grille régulière de 1 km² de 1958 à 2017. Elles ont été désagrégées au pas de temps horaire selon la méthode présentée dans un rapport dédié (Mas et Evin, 2021) du projet HYDRODEMO.

Les forçages météorologiques à l'échelle du bassin versant sont obtenus en moyennant les valeurs des pixels de la grille de forçage appartenant au bassin.

2.2 Débits observés

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. Les débits EDF nous ont été fournis au pas de temps horaire.

L'utilisation de séries au pas de temps horaire peut représenter une limite pour l'étude des phénomènes torrentiels sur les petits bassins versants (moins de 20 km²) 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 km²), l'utilisation d'un modèle hydrologique requérant par ailleurs des séries de forçage suffisamment longue pour sa calibration.

2.3 Échantillon 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 km²) 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 écarts très importants entre deux mesures 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 aux 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 1.

Les distributions d'un certain nombre de descripteurs physiques des bassins sont illustrées sur la figure 2. L'échantillon est majoritairement composé de petits bassins versants dont la surface ne dépasse pas 200 km² 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).

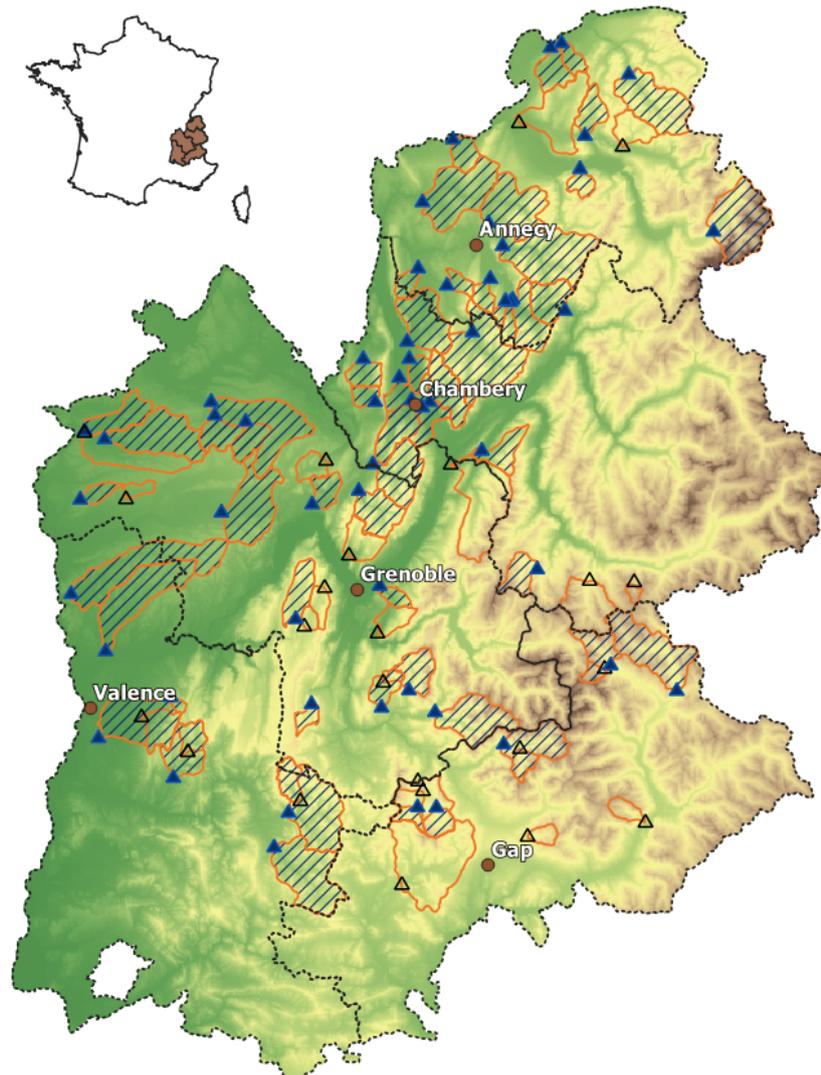


FIGURE 1 – Contours des 79 bassins versants jaugés et localisation de leurs exutoires. Les 56 bassins hachurés et dont l'exutoire est représenté par un triangle plein sont ceux utilisés pour l'expérience de calage-validation.

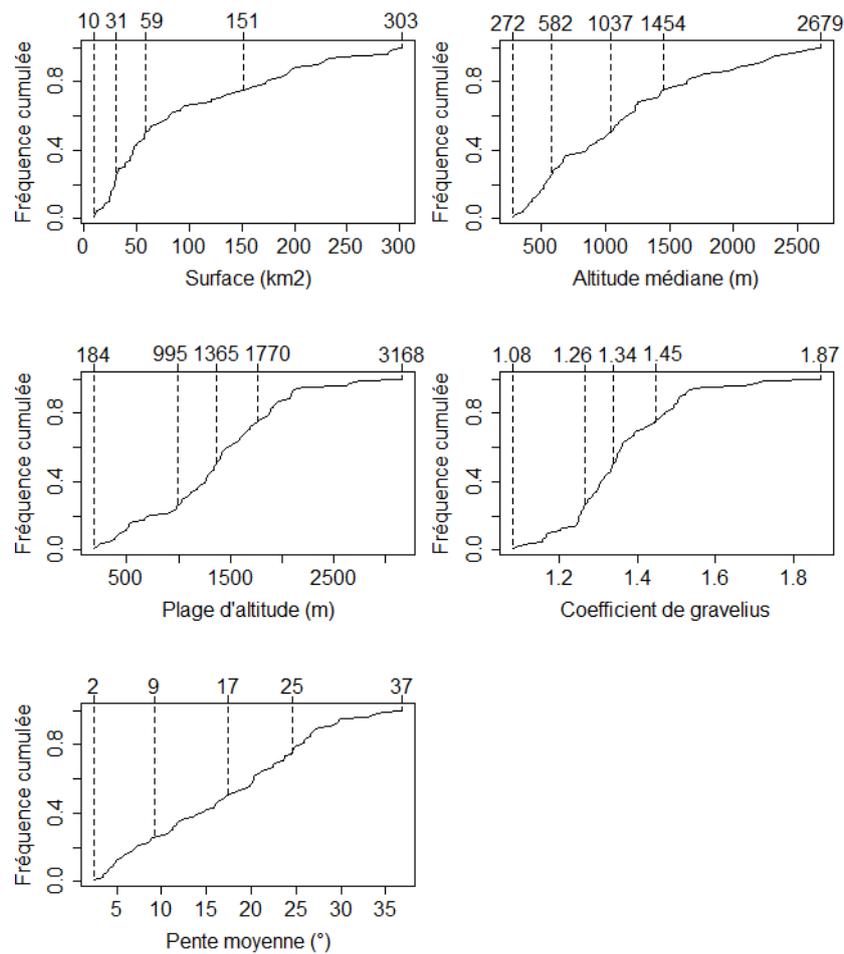


FIGURE 2 – Distribution de la surface, de l'altitude médiane, de la plage d'altitude, du coefficient de Gravelius et de la pente moyenne des 79 bassins versants jaugés. Les valeurs minimale, médiane et maximale ainsi que les quantiles à 25% et 75% sont précisés.

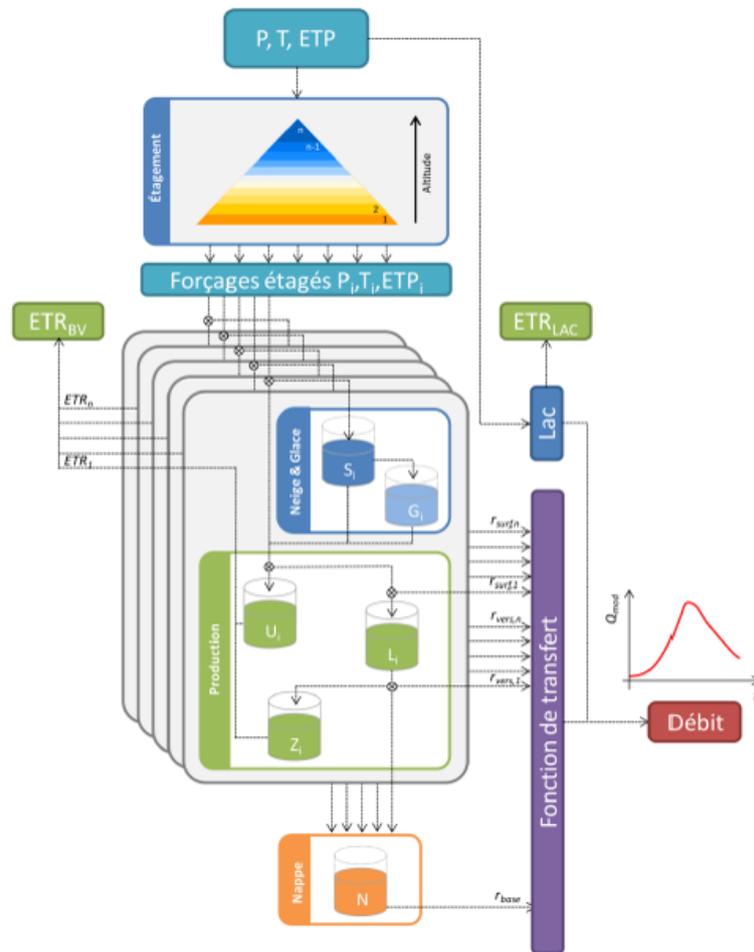


Figure 1 : Schéma fonctionnel de MORDOR SD.

FIGURE 3 – Structure du modèle hydrologique MORDOR-SD. Tiré de Garavaglia *et al.* (2017)

2.4 Modèle hydrologique

Le modèle MORDOR (Garçon, 1996) est développé et utilisé par EDF depuis plus de 30 ans pour une large gamme d'application : 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 ainsi que d'améliorer 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 3.

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).

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 [km ² /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 – Paramètres du modèle hydrologique MORDOR-SD. Adapté de Garavaglia et Le Lay (2017).

L'ensemble des processus représentés par MORDOR-SD sont contrôlés par 24 paramètres qui sont décrits dans la figure 4. Ces paramètres peuvent être prescrits ou ajustés par calage à partir des mesures météorologiques et hydrologiques (voir ci-dessous).

3 Stratégie de calage de MORDOR-SD

3.1 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'HYDRODEMO, 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.

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 *csbv* fait l'objet d'un calage indépendant décrit en section 3.2. 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.

3.2 Correction du bilan hydrologique

Sur une durée suffisamment longue, le bilan hydrologique d'un bassin versant s'écrit :

$$\frac{Q_{obs}}{S} = P + E_{obs} + D \quad (1)$$

avec Q_{obs} le volume d'eau écoulé réel (m^3), S la surface du bassin versant (km^2), P la lame d'eau précipitée (mm), E_{obs} la lame d'eau évaporée réelle (mm) et D un terme d'apport ou de perte (mm). Les échanges extérieurs D peuvent être d'origine naturelle ou anthropique et sont généralement inconnus. Si rien n'est fait dans le modèle pour prendre en compte ces échanges, le bilan hydrologique simulé n'est pas cohérent et abouti à un biais sur les débits. Le choix qui a été fait pour MORDOR-SD est d'utiliser des paramètres de correction des différents termes du bilan hydrologique simulé qui s'écrit :

$$\frac{Q_{sim}}{csbv \times S} = cp \times P + cetp \times E_{sim} \quad (2)$$

avec les mêmes unités que dans l'équation 1. Le paramètre cp (resp. $cetp$) permet de corriger le biais sur les précipitations (resp. l'évapotranspiration potentielle). Le paramètre $csbv$ permet 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. Comme mentionné précédemment, on a choisi de fixer le paramètre $cetp$ à 1. Lors du calage, le bilan hydrologique simulé peut donc être corrigé avec les paramètres cp et $csbv$. Si ces deux paramètres sont libres, il existe une infinité de combinaisons possibles pour corriger le bilan. Afin que cp et $csbv$ gardent un certain sens physique, un travail préalable a été mené pour fixer le paramètre $csbv$ sur tous les bassins. La méthode utilisée est présentée en détail en annexe A.

3.3 Bassins à contribution glaciaire

Cinq bassins de l'échantillon complet de bassins jaugés sont concernés par la présence de glaciers. La surface relative englacée de ces bassins est un paramètre d'entrée du modèle. ces surfaces ont été estimées manuellement à partir des images aériennes et des cartes topographiques du portail IGN. Les surfaces obtenues pour chaque bassin sont fournies dans le tableau 1. Il est à noter que les paramètres du module glace de MORDOR-SD sont mal contraints par un calage sur des données de débits uniquement et peuvent interagir fortement avec d'autres paramètres. La seule manière de s'assurer de la cohérence des paramètres est de vérifier que le bilan de glace sur la période complète de simulation est déficitaire et cohérente avec les estimations de perte de masse glaciaire de la littérature (Rabatel *et al.*, 2016).

3.4 Périodes et critères de calage

Deux expériences de calage distinctes ont été menées. La première a consisté à effectuer des exercices de calage-validation du modèle sur chaque bassin disposant d'au moins 15 ans de données de débits observés sur la période 1997-2017 en utilisant les forçages de précipitation Spazm et Comephore. Le principe du calage-validation est de caler le modèle sur un sous-ensemble de la période couverte par les données et d'évaluer les performances du modèle sur le reste de la période n'ayant pas servi au calage. En divisant la période couverte totale en deux périodes égales, on peut répéter l'exercice

Nom du bassin	Surface englacée relative (%)
L'Arve à Chamonix	27.5
La Séveraisse à Villar Loubière	2
L'Arvan à Saint Jean d'Arves	4
Le Petit Tabuc au Monetier les Bains	15
La Guisane au Monetier les Bains	2.5

TABLE 1 – Bassins à contribution glaciaire et surface englacée relative.

deux fois (calage sur $p1$ et validation sur $p2$, puis calage sur $p2$ et validation sur $p1$). Le but est de comparer les performances du modèle sur ces deux exercices et évaluer la robustesse des jeux de paramètres issus des calages sur chacune des deux sous-périodes. Pour cette première expérience, on exploite les données de 56 bassins versants jaugés identifiés sur la figure 1.

La deuxième expérience a consisté à caler le modèle sur chaque bassin en utilisant la totalité de la chronique de débits observés et le forçage de précipitation Spazm. On obtient ainsi une paramétrisation la plus robuste possible qui sera utilisée pour simuler les débits sur chaque bassin sur la totalité de la période de disponibilité des forçages Spazm. On utilise ici l'échantillon complet de 79 bassins versants jaugés. Il est à noter que pour des raisons pratiques liées au temps de calcul et à la consommation de mémoire informatique, l'utilitaire de calage ne peut pas traiter des séries de longueur supérieures à 200000 pas de temps, soit environ 22 ans pour des séries horaires. Il n'est donc pas possible de caler le modèle sur l'entièreté des chroniques de débits observés quand celles-ci couvrent plus de 20 ans. Pour chaque bassin où cette situation se présente, la stratégie a été de caler le modèle sur plusieurs sous-périodes de 22 ans puis d'évaluer les performances de chaque calage sur la chronique complète de débits observés. On retient ensuite la paramétrisation qui donne la meilleure performance globale.

Les outils développés par EDF pour l'exploitation de MORDOR-SD incluent un algorithme de calage exploité dans le cadre d'HYDRODEMO. L'un de ses points forts est de permettre l'utilisation d'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.*, 2009) dont la formulation est développée dans l'équation 3.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2}, \quad (3)$$

avec r le coefficient de corrélation entre la variable observée et la variable simulée, μ la moyenne et σ l'écart-type.

Le critère KGE est compris entre $-\infty$ et 1, cette dernière valeur traduisant une adéquation parfaite entre la variable simulée et la variable observée. La fonction FO minimisée par l'algorithme de calage est présentée dans l'équation suivante :

$$FO = 1 - \left(\frac{1}{3}KGE_Q + \frac{1}{3}KGE_{reg} + \frac{1}{3}KGE_{Qcla}\right), \quad (4)$$

où des poids identiques sont attribués aux trois critères.

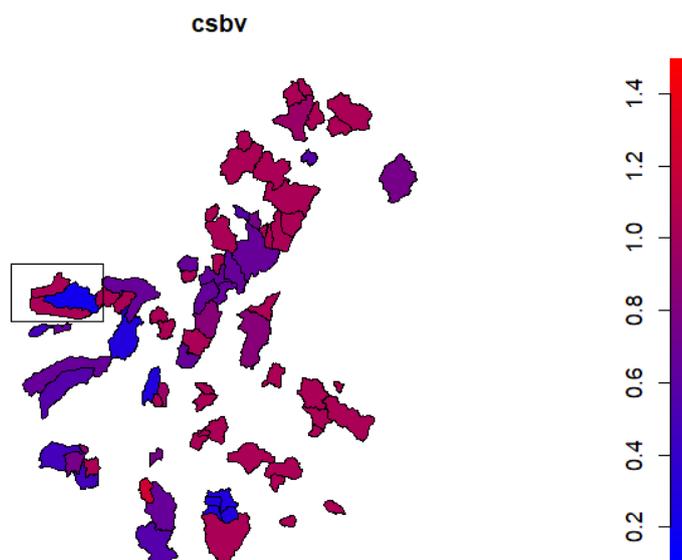


FIGURE 5 – Carte des valeurs du paramètre *csbv* obtenues sur les 79 bassins versants de l'échantillon de bassins jaugés (voir Annexe A).

4 Résultats des calages

4.1 Correction du bilan hydrologique - calage de *csbv*

Les résultats obtenus à l'issue de la procédure présentée en 3.2 sont présentés sur la figure 5. On dispose ainsi pour chaque bassin jaugé d'une valeur de *csbv* qui est fixée pour toutes les autres expériences.

Les valeurs de *csbv* inférieures à 1 se retrouvent principalement pour les bassins des massifs montagneux dont la géologie favorise les circulations karstiques (Dévoluy, Vercors, Chartreuse et Bauges dans une moindre mesure) ainsi que dans les bassins de plaine ayant une forte connexion avec la nappe (bassins de la plaine de Valence et du Nord Isère en particulier). On note une particularité intéressante pour les bassins situés dans la zone des 4 vallées (encadré sur la figure 5), avec deux bassins ayant un *csbv* égal à 1 qui encadrent un bassin avec un *csbv* très faible. La géologie particulière de cette zone engendre une infiltration importante des eaux de surface à l'amont des bassins et une contribution importante des eaux souterraines à l'écoulement de surface sur la partie aval des bassins, et sur une longueur très limitée de cours d'eau (Brenot et Dupré la Tour, 2010). Ainsi, selon que la station de mesure du débit est située dans cette zone (cas des deux bassins avec *csbv* = 1) ou en amont (cas du bassin avec *csbv* = 0.2), elle captera ou pas la contribution de la nappe à l'écoulement de surface.

4.2 Expérience de calage - validation

4.2.1 Paramétrisation du modèle

Pour chaque paramètre calé, on compare les résultats issus des calages sur les deux sous-périodes avec le forçage de précipitation Comephore (figure 6) et Spazm (figure 7).

La stabilité des paramètres entre les deux périodes est très variable. Les paramètres *gtz*, *gpz*, *kf*, *eft* et *efp*, qui pilotent principalement l'accumulation et la fonte de la neige, sont ceux pour lesquels les variations sont les plus importantes, autant avec Comephore qu'avec Spazm. La forte paramétrisation

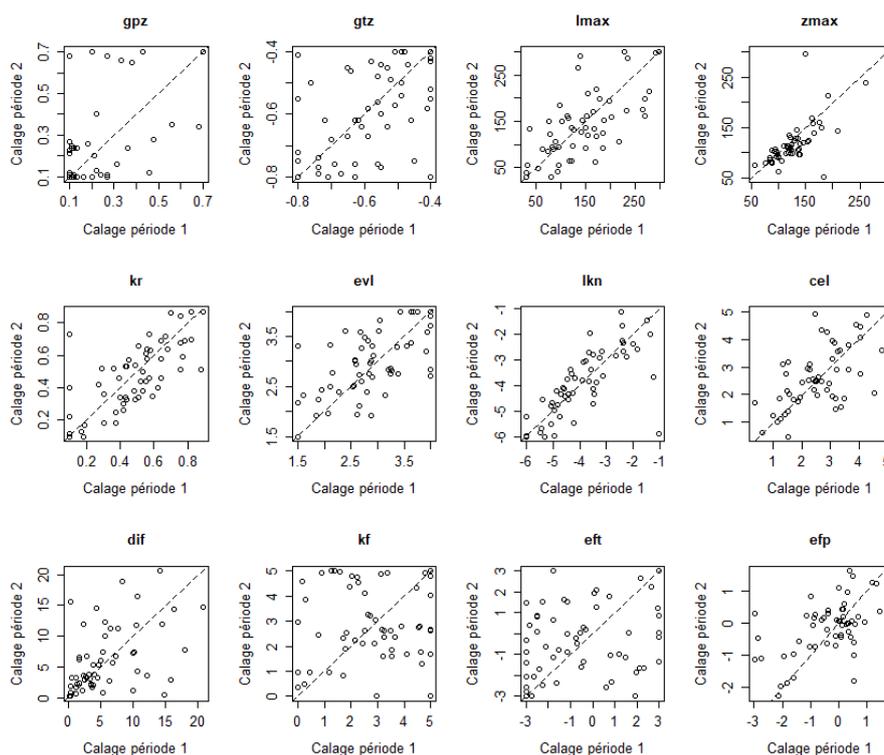


FIGURE 6 – Comparaison des paramètres obtenus par calage sur deux périodes distinctes avec le forçage de précipitation Comephore.

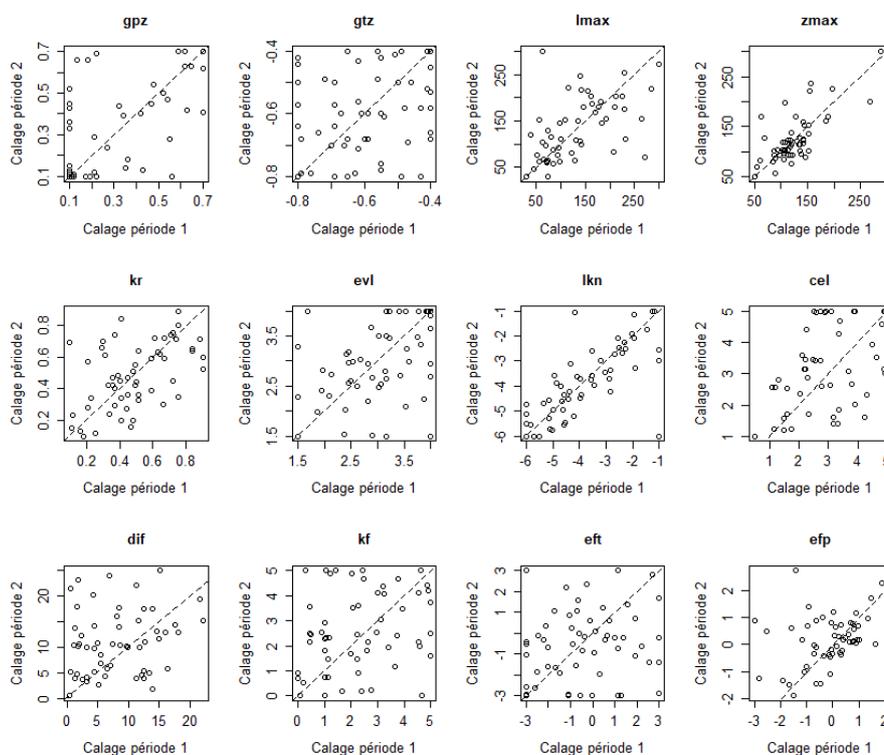


FIGURE 7 – Comparaison des paramètres obtenus par calage sur deux périodes distinctes avec le forçage de précipitation Spazm.

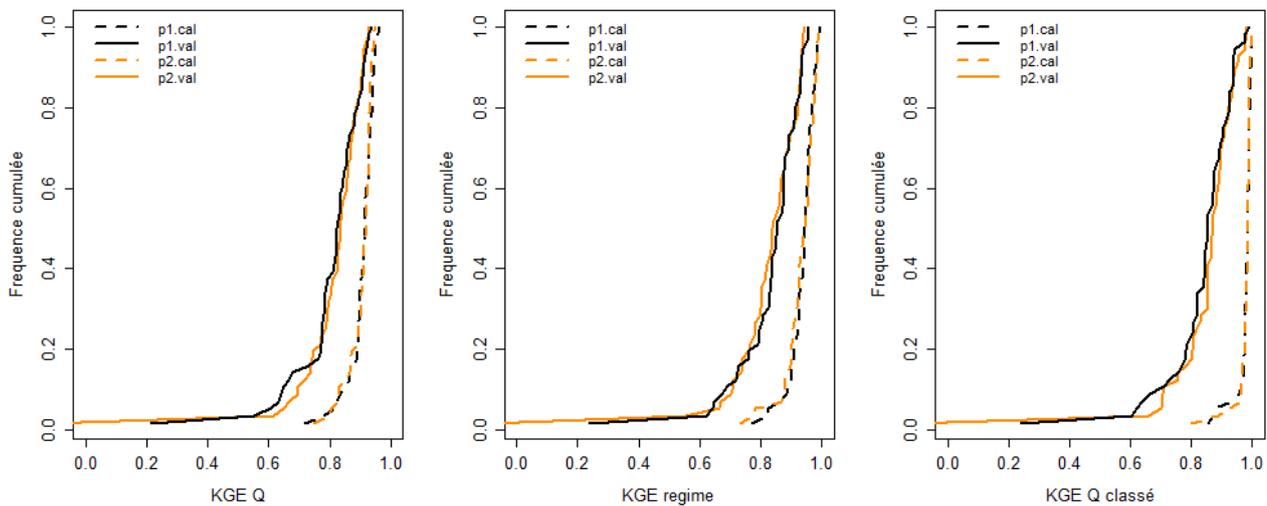


FIGURE 8 – Évaluation avec le critère KGE sur trois signatures hydrologiques des performances de MORDOR-SD en calage-validation avec le forçage de précipitation Comephore.

du module neige de MORDOR-SD entraîne des interactions importantes entre paramètres (Garavaglia et Le Lay, 2017). En l'absence de données de contrainte spécifiques relatives à l'évolution de la couverture neigeuse du bassin, les paramètres du module neige sont calés pour reproduire au mieux le régime hydrologique du bassin versant. Cette information n'est généralement pas suffisante pour limiter les interactions entre paramètres et assurer leur identifiabilité, ce qui peut expliquer dispersion de leurs valeurs d'une période à l'autre.

Les paramètres $zmax$, kr et lkn présentent dans l'ensemble une bonne stabilité entre les deux périodes. Le paramètre evn étant fixé, la dynamique du réservoir de nappe est pilotée uniquement par lkn qui n'est en interaction forte avec aucun autre paramètre (Rouhier, 2018). De plus, le calage sur des données horaires permet normalement au modèle de reproduire au mieux la contribution relative des écoulements de surface et souterrains au débit total. Cela permet d'expliquer la bonne identifiabilité du paramètre lkn avec les deux forçages de précipitation. Les paramètres cel et dif semblent mieux contraints avec Comephore qu'avec Spazm. Ce dernier forçage fournissant une information de précipitation moins riche au pas de temps horaire que Comephore puisqu'il est issu d'une désagrégation du pas de temps journalier à l'horaire, il limite la capacité du modèle à reproduire finement les hydrogrammes de crues. La sensibilité aux paramètres cel et dif s'en trouve potentiellement réduite, ce qui limite leur identifiabilité. De plus, et ce pour les deux forçages de précipitation, on peut s'attendre à ce que l'hétérogénéité des précipitations entre les deux périodes limite potentiellement les possibilités d'identification des paramètres. Si l'une des périodes est plus sèche, le modèle dispose de moins d'évènements de crues pour ajuster les paramètres de la fonction de transfert.

4.2.2 Performances du modèle

On présente sur les figures 8 et 9 les résultats obtenus avec les forçages de précipitation Comephore et Spazm sur les 56 bassins de l'échantillon de calage-validation. Les identifiants $p1$ et $p2$ désignent respectivement les périodes 1997-2007 et 2007-2017.

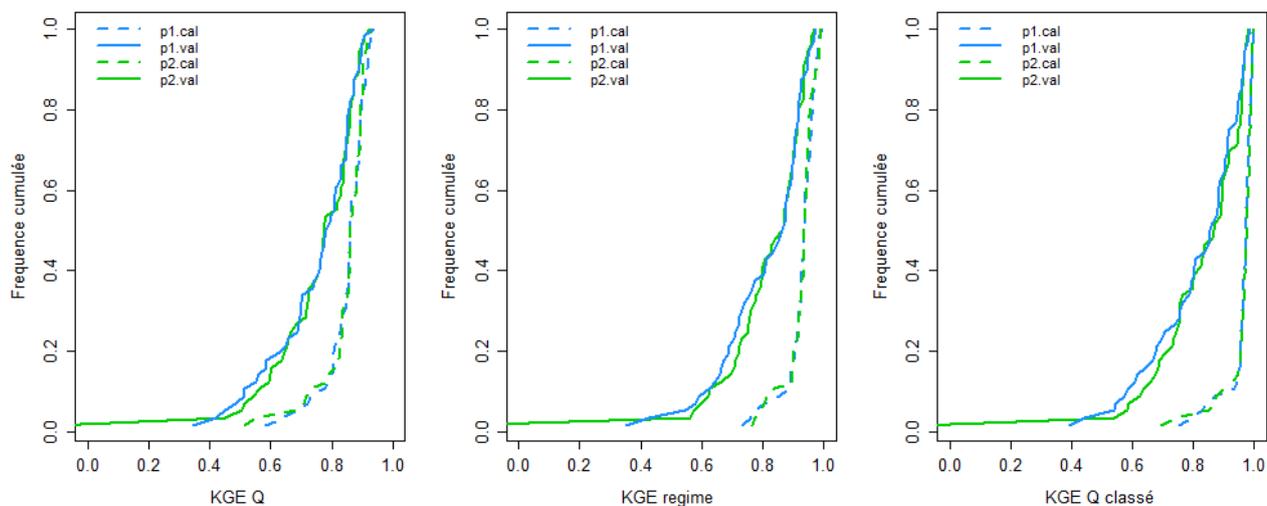


FIGURE 9 – Évaluation avec le critère KGE sur trois signatures hydrologiques des performances de MORDOR-SD en calage-validation avec le forçage de précipitation Spazm.

Comephore Les performances en calage sont très bonnes avec un critère de KGE sur les débits supérieur à 0.9 pour 50% des bassins, pour les deux périodes. De plus, moins de 10% des bassins présentent un KGE sur les débits inférieur à 0.85, peu importe la période de calage. Les performances sont également très bonnes pour le KGE évalué sur les régimes et les débits classés.

Les performances en validation sont inférieures aux performances de calage de 10% en moyenne pour le KGE sur les débits. Cet écart est légèrement supérieur pour le KGE sur les régimes et nettement supérieur pour le KGE sur les débits classés (environ 20% en moyenne). De manière générale les performances restent bonnes, avec des KGE médians supérieurs à 0.8 et entre 10% à 20% de bassins présentant des scores acceptables. On identifie un bassin pour lequel les performances en validation sont mauvaises sur les deux périodes. Il s'agit d'un bassin pour lequel des doutes existent sur l'homogénéité des mesures de débits, ce que les résultats de modélisation semblent confirmer.

Les performances sont identiques sur les deux périodes, autant en calage qu'en validation. Le modèle n'est donc pas sensible aux éventuelles différences qui pourraient exister entre les deux périodes en terme de forçages et parvient à identifier un jeu de paramètre optimal pour chaque période. Le diagnostic des résultats bassin par bassin a confirmé que les écarts de performances entre les deux périodes en calage (resp. en validation) étaient minimes.

Spazm Les performances en calage sont bonnes avec un critère de KGE sur les débits médian supérieur à 0.85 pour les deux périodes. Environ 20% des bassins présentent un KGE sur les débits inférieur à 0.8, peu importe la période de calage. Les performances de calage évaluées sur les régimes et les débits classés sont proches de celles obtenues avec Comephore.

Les performances en validation sont inférieures aux performances de calage de 15% en moyenne pour le KGE sur les débits. Cet écart est légèrement supérieur pour le KGE sur les régimes et nettement supérieur pour le KGE sur les débits classés (environ 25% en moyenne). Les performances sont inégales, avec des KGE médians autour de 0.8 et entre 20% à 30% des bassins qui présentent des KGE

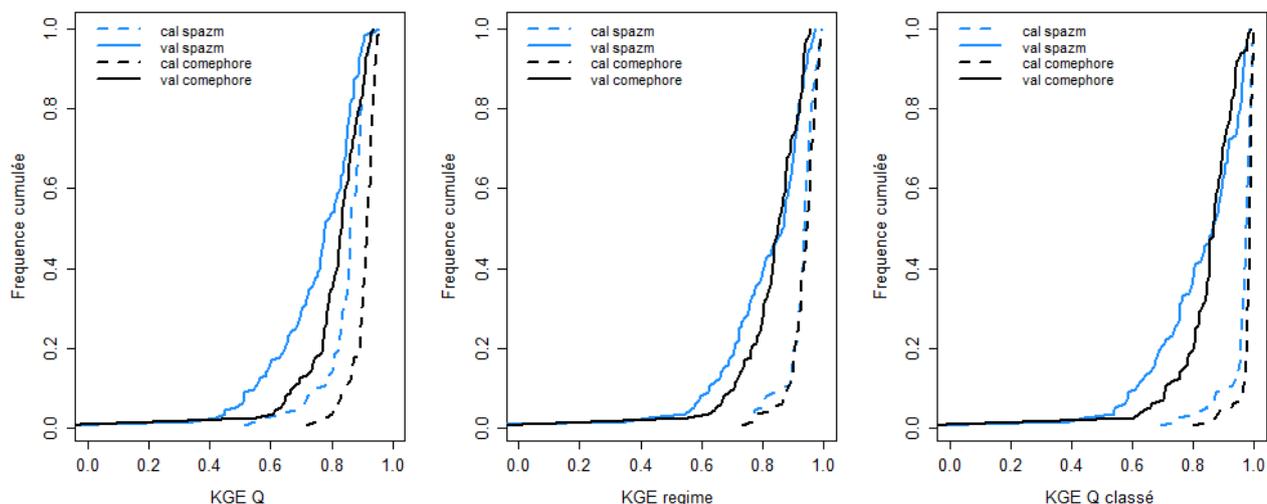


FIGURE 10 – Comparaison des performances de MORDOR-SD obtenues avec les forçages de précipitation Spazm et Comephore en calage et validation avec le critère KGE sur trois signatures hydrologiques. Les scores ont été agrégés sur les deux périodes pour faciliter la lisibilité.

inférieurs à 0.7. On retrouve le bassin pour lequel les performances en validation sont mauvaises sur les deux périodes.

De la même manière qu’avec le forçage Comephore, les performances globales sur les deux périodes sont très similaires, autant en calage qu’en validation.

La figure 10 présente une comparaison des performances obtenues avec Spazm et Comephore en calage et en validation. Les performances de calage sont moins bonnes avec Spazm qu’avec Comephore pour le KGE sur les débits. Elles sont identiques pour le KGE sur les régimes et très légèrement inférieures pour le KGE sur les débits classés. Les performances en validation sont plus variables avec Spazm qu’avec Comephore pour les trois signatures hydrologiques. Elles sont globalement similaires pour les 50% meilleures performances, mais elles sont moins bonnes avec Spazm pour les 50% moins bonnes performances.

4.3 Calage sur périodes maximales

4.3.1 Performances du modèle

Afin de définir un jeu de paramètres optimal pour chaque bassin et chaque forçage de précipitation, le modèle a été calé en utilisant la totalité des données de débit observé. Les résultats en termes de performances sont présentés sur la figure 11.

Comme expliqué en section 3.4, le calage n’est possible que sur une période de 22 ans au maximum. On constate néanmoins que le fait de calculer les critères sur la période complète de disponibilité des débits, et donc sur des données n’ayant pas servi au calage, n’entraîne pas une diminution significative des performances. Cela confirme la robustesse des jeux de paramètres issus du calage. Les performances sont similaires à celles obtenues en calage lors des expériences de calage validation, avec un KGE sur les débits plus élevé avec Comephore et des KGE semblables sur le régime et les débits classés.

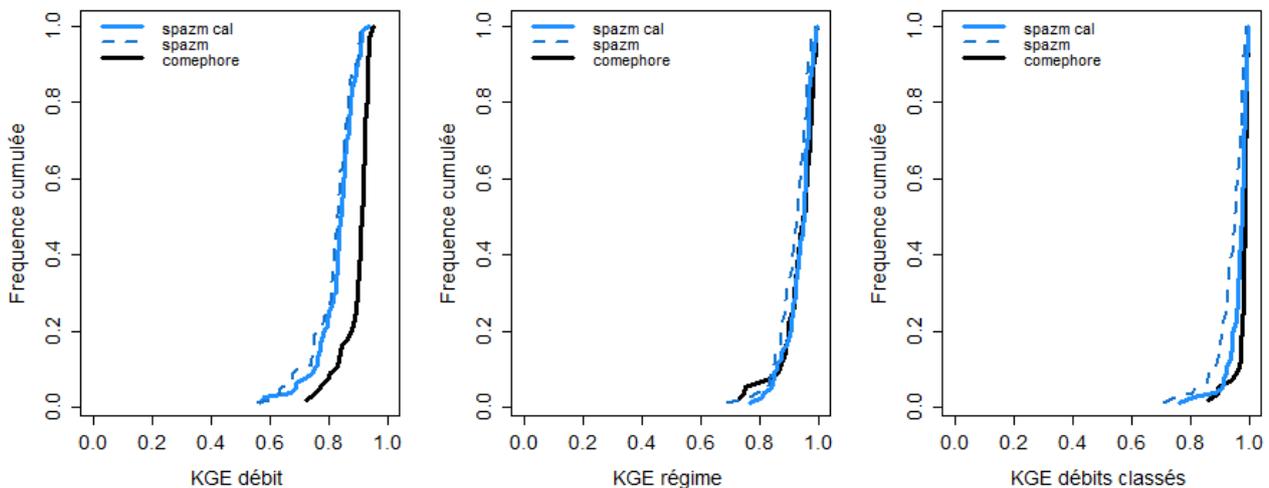


FIGURE 11 – Évaluation avec le critère KGE sur trois signatures hydrologiques des performances en calant sur la totalité des observations de débit disponibles de MORDOR-SD avec les forçages de précipitation Spazm (79 bassins) et Comephore (56 bassins).

4.3.2 Distribution des paramètres

Les paramétrisations finales sur chaque bassin ont été utilisées pour étudier la distribution spatiale des paramètres. On ne détaille ici que les paramètres dont la variabilité spatiale revêt un caractère particulier.

Les cartes du paramètre cp sont cohérentes avec le diagnostic effectué sur les forçages de précipitation. Avec Comephore, les bassins avec un cp inférieur à 1 sont localisés sur le piémont des massifs pré-alpins et à basse altitude où la visibilité radar est la meilleure. Les bassins des massifs intérieurs et plus généralement ceux situés en altitude présentent en revanche des cp très supérieurs à 1 ce qui indique une sous-estimation des précipitations. Avec Spazm, la distribution spatiale de cp est plus homogène et l'intervalle de variation du paramètre est plus réduit. Les deux bassins qui présentent un cp très supérieur à 1 sont des petits bassins glaciaires pour lesquels la sur-accumulation de précipitation sous forme solide en hiver contribue à augmenter le stock de glace mais n'a pas d'impact sur les débits simulés. On atteint ici les limites exposées en 3.3 quand au calage du module glaciaire uniquement sur des données de débit.

5 Extension en contexte non-jaugé

5.1 Objectif et principe d'évaluation

La majorité des petits bassins versants torrentiels souffrent d'une absence d'instrumentation limitant la connaissance de leur fonctionnement hydrologique (Poncet, 1975). Or ces petits bassins versants sont précisément ceux que le projet HYDRODEMO vise à mieux connaître, en particulier du point de vue des épisodes de crues. De nombreuses méthodes parcimonieuses existent pour évaluer des variables ou des signatures hydrologiques en contexte non jaugé. Cependant, ces méthodes ne fournissent généralement une information que sur un aspect particulier du fonctionnement hydrologique du bassin à partir de descripteurs physiques ou de variables climatiques particulières. Par exemple, la

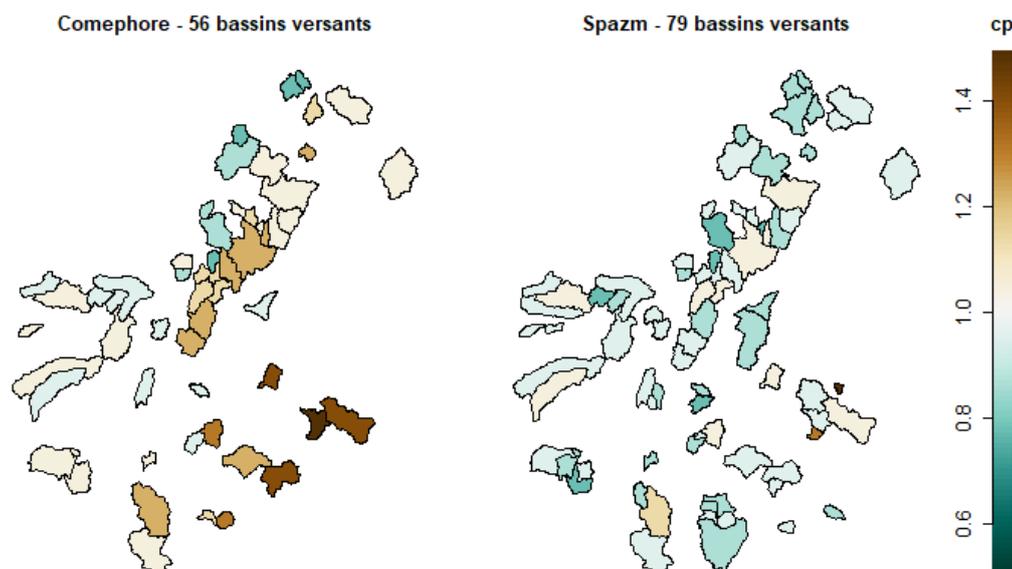


FIGURE 12 – Carte du paramètre cp issu du calage sur périodes maximales avec les forçages de précipitation Comephore et Spazm.

formule Crupedix, longtemps utilisée en France pour estimer le débit de pointe décennal, se base sur la pluie journalière décennale et la superficie du bassins versants et peut donc être appliquée sur un bassin non jaugé. D'autres formules ont été proposées sur les bassins versants torrentiels des Pyrénées (Peteuil *et al.*, 2010) et des Alpes (Peteuil *et al.*, 2011). Cependant, ces formules permettent surtout de représenter l'effet d'échelle lié à la taille des bassins et ne tiennent pas compte des fonctionnements hydrologiques particuliers liés aux caractéristiques géomorphologiques. On notera également qu'ils ne permettent pas d'estimer d'autres variables hydrologiques (volume/durée des crues).

L'utilisation d'un modèle hydrologique permet de s'affranchir de ces contraintes puisqu'on peut extraire toutes les informations voulues à partir de la chronique de débit simulé. Cependant, en l'absence de données de débits observés, il n'est pas possible de caler le modèle hydrologique MORDOR-SD. Nous proposons ici une méthode permettant de paramétrer ce modèle sans utiliser d'information hydrométrique, tout en dégradant au minimum les performances du modèle. On utilisera par la suite le terme de régionalisation pour désigner cette méthode (Blöschl et Sivapalan, 1995).

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 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 13. 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 comme illustré sur la figure 14. La mise au point de la méthode de régionalisation sera effectuée avec les précipitations Spazm qui possèdent des biais de volume plus faibles et plus homogènes spatialement que les précipitations

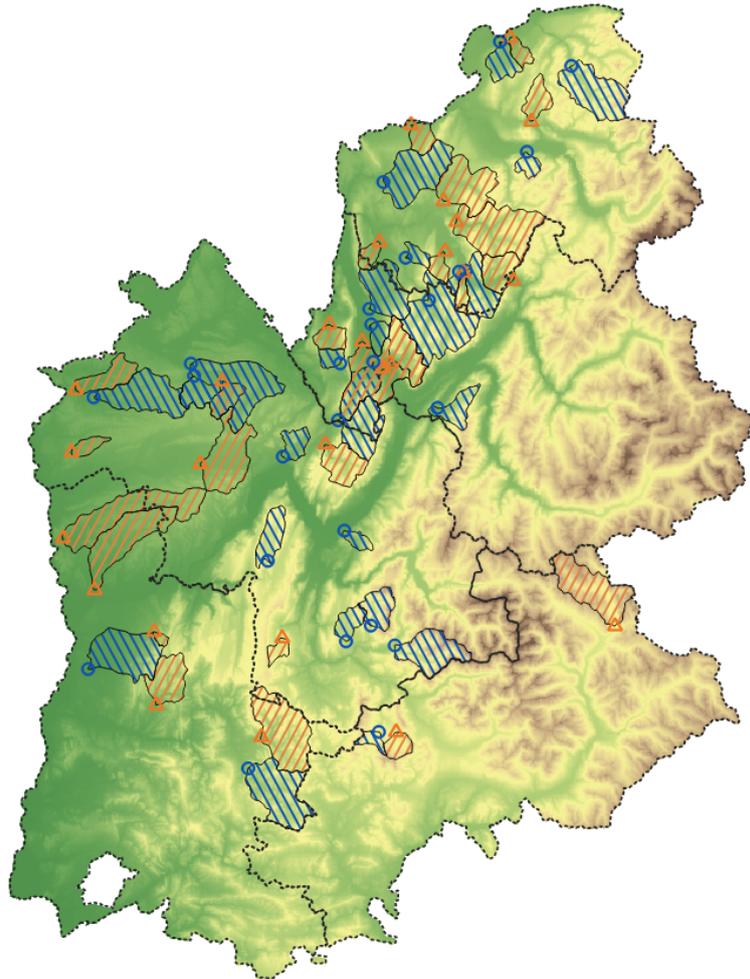


FIGURE 13 – Contours et exutoires des 52 bassins versants utilisés pour l'expérience de régionalisation. Les deux groupes de bassins sont identifiés par des symbologies différentes.

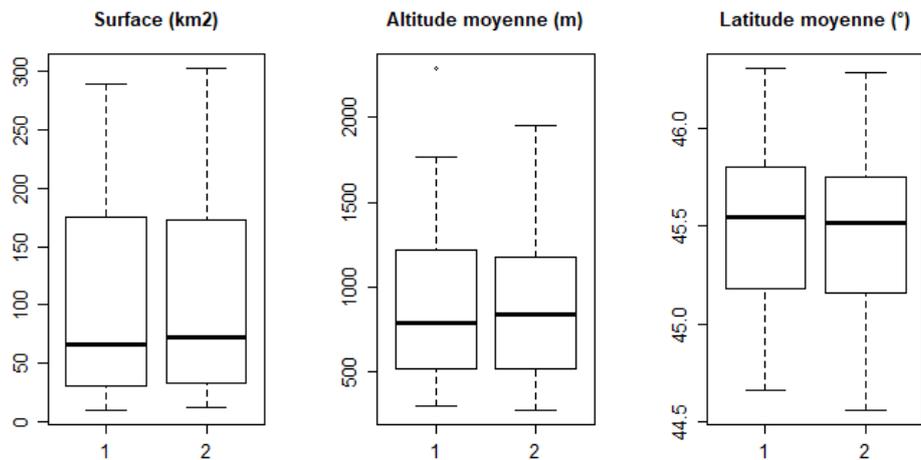


FIGURE 14 – Distribution de la surface, de l’altitude moyenne et de la latitude moyenne des bassins des deux groupes utilisés pour l’expérience en pseudo non-jaugé.

Comephore. De plus cela permettra d’effectuer des simulations sur une plus longue période historique, les réanalyses Spazm étant disponibles depuis 1948. Une fois la méthode de régionalisation finalisée, elle sera également testée avec les précipitations Comephore.

5.2 Paramétrisation du modèle

5.2.1 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 les deux approches, 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). Enfin, sur la base de nos résultats, on a choisi de ne pas caler le paramètre *cp*. Des détails sont donnés ci-après pour chaque paramètre.

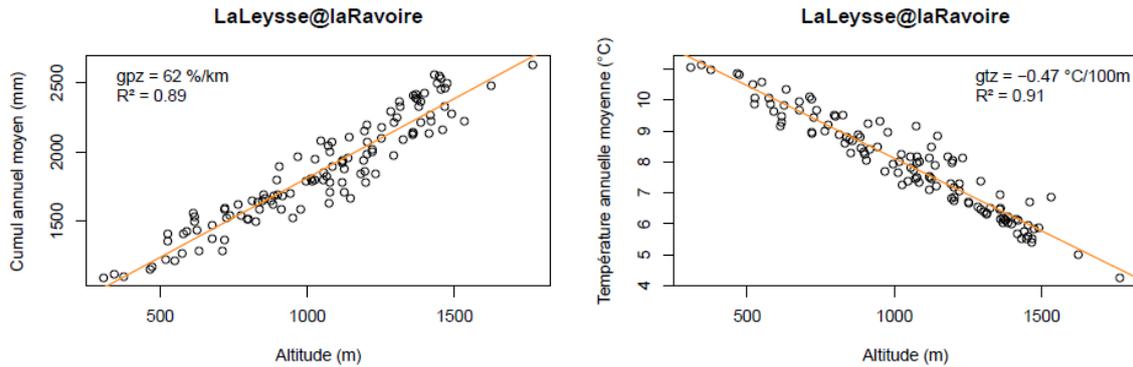


FIGURE 15 – Illustration du principe de calcul des paramètres gpz et gtz sur le bassin de la Laysse à La Ravoire.

cp : Les précédentes expériences de calage avec la précipitation Spazm ont montré que le paramètre cp variait entre 0.8 et 1 et qu'il n'avait à priori pas de structure spatiale évidente (voir figure 12). Sa valeur ne pouvant être déterminé que par bouclage du bilan hydrologique (et donc avec des données de débit observé), il a été décidé de la fixer à 0.9 correspondant à une hypothèse de surestimation moyenne de 10% des précipitations SPAZM.

gtz et gpz : Les gradients de température et de précipitation peuvent être calculés pour tout bassin en utilisant les données Spazm comme illustré sur la figure 15. 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 (Garavaglia et Le Lay, 2017), les autres paramètres du module neige disposant toujours d'assez de degrés de liberté pour simuler correctement l'évolution du stock de neige. On voit par ailleurs sur les figures 6 et 7 que les valeurs de eft sont très dispersées entre les deux périodes de calage, ce qui souligne la mauvaise identifiabilité du paramètre et motive sa prescription afin de limiter les interactions.

Concernant le paramètre $csbv$, on utilise les valeurs déterminées préalablement sur chaque bassin avec la procédure présentée en 3.2.

5.2.2 Calage des paramètres restants

Les six paramètres restants à caler 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 .

5.2.3 Régionalisation des paramètres

Trois stratégies de régionalisation ont été testées :

1. **Transfert uniforme "Médian"** : valeur médiane de chaque paramètre obtenue sur l'échantillon de bassins versants du groupe de calage.
2. **Transfert uniforme "Optimal"** : jeu de paramètres qui donne la meilleure performance moyenne sur l'ensemble des bassins de calage. Cette performance est évaluée avec la même fonction objective que celle utilisée pour le calage du modèle (équation 4). Sur chacun des n bassins de l'échantillon, on simule les débits avec les jeux de paramètres des $n - 1$ bassins restants. On calcule ensuite le rang en terme de performance de chaque jeu de paramètres. On additionne enfin les rangs obtenus par chaque jeu de paramètres sur les $n - 1$ bassins receveurs, et on sélectionne le jeu de paramètres qui possède la plus petite somme de rangs.
3. **Similarité entre bassins** : Paramètres du bassin de calage le plus similaire. L'indice de similarité Φ_j entre le bassin donneur j et le bassin cible i est calculé selon l'équation 5 (Burn et Boorman, 1992). Le bassin de calage dont les caractéristiques minimisent l'indice est sélectionné comme donneur.

$$\Phi_j = \frac{|S_c^j - S_v^i|}{\max(|S_c - S_v^i|)} + \frac{|Z_c^j - Z_v^i|}{\max(|Z_c - Z_v^i|)} + \frac{D_c^{j,i}}{\max(D_c^i)} \quad (5)$$

avec S la surface des bassin, Z l'altitude médiane et D la distance entre les centres des bassins.

5.3 Résultats

5.3.1 Calage

Paramètres Les valeurs des paramètres déterminées à partir de descripteurs de bassins sont présentées sur la figure 16. Pour l'ensemble des paramètres, on constate des différences importantes entre ces valeurs et celles calées, que ce soit concernant leur distribution globale (valeurs centrales et marginales) ou de corrélation pour chaque bassin. On constate par exemple que plus de la moitié des bassins (32/52) ont un gpz calé compris entre 0.1 et 0.2, alors que les valeurs déterminées à partir de descripteurs de bassins ne sont que deux dans cet intervalle et ont une distribution beaucoup plus homogène. Le constat est inversé pour le paramètre dif , avec des valeurs liées aux descripteurs majoritairement comprises entre 0 et 6 (44/52) alors que moins d'un tiers des valeurs calées (16/52) sont comprises dans cette plage.

Les valeurs des paramètres obtenues par calage sont présentées sur la figure 17. On constate que les distributions obtenues avec les deux calages sont relativement proches pour les 6 paramètres. Les différences les plus importantes apparaissent pour les paramètres $umax$ et $lmax$. On note de plus une bonne corrélation entre les valeurs issues de deux calages pour les paramètres lkn , efp et dans une moindre mesure evl .

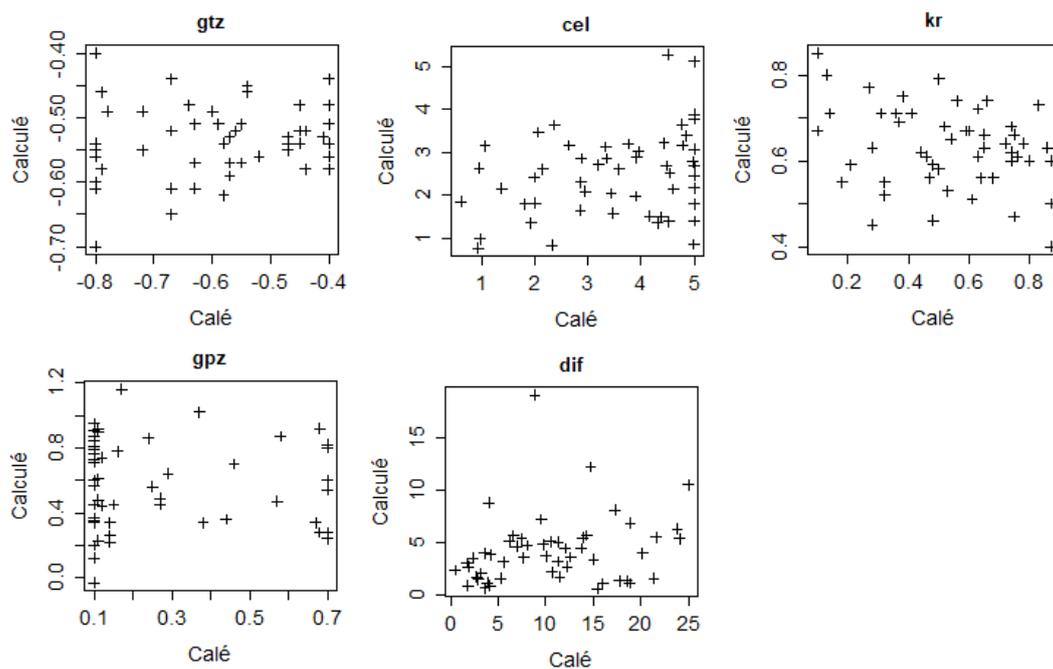


FIGURE 16 – Valeurs des paramètres déterminés à partir de descripteurs de bassins pour l’expérience de régionalisation (”calculé”) et comparaison aux valeurs obtenues lors du calage à 13 paramètres avec le forçage de précipitation Spazm sur les deux groupes de bassins de l’expérience de régionalisation.

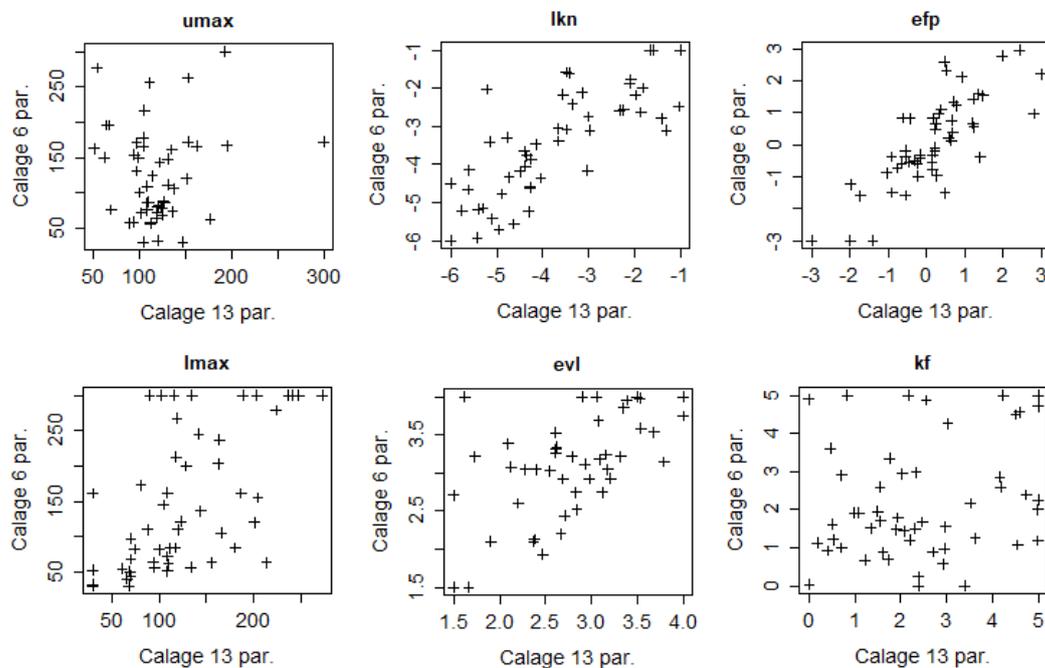


FIGURE 17 – Valeurs des paramètres calés pour l’expérience de régionalisation et comparaison aux valeurs obtenues lors du calage à 13 paramètres avec le forçage de précipitation Spazm sur les deux groupes de bassins de l’expérience de régionalisation.

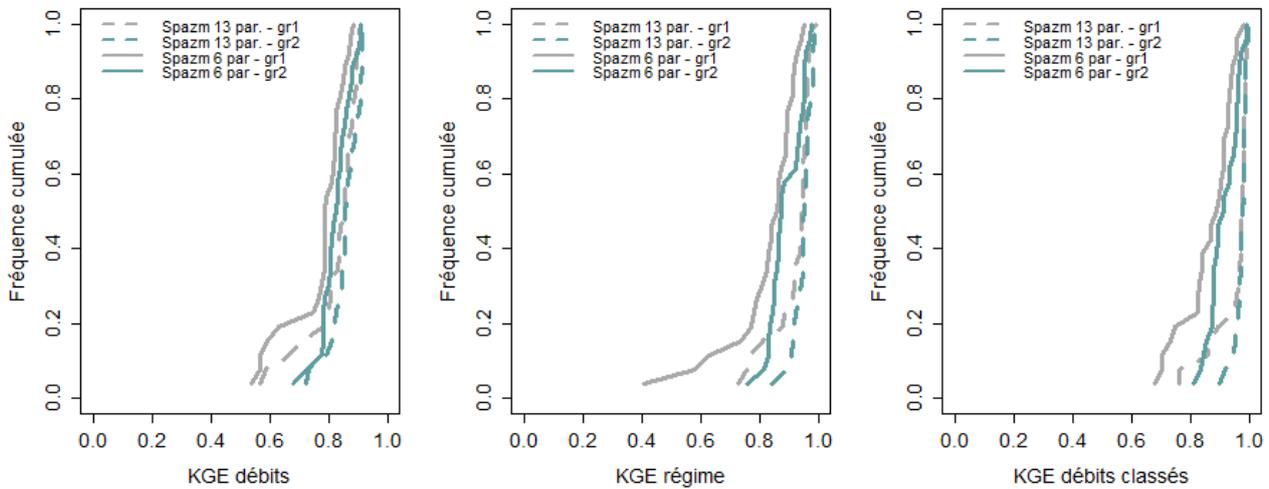


FIGURE 18 – Comparaison des performances de calage à 13 paramètres libres et 6 paramètres libres avec le forçage de précipitation Spazm sur les deux groupes de bassins de l’expérience de régionalisation. Les performances sont évaluées avec le critère KGE sur trois signatures hydrologiques.

Méthode	l_{max}	zu_{max}	evl	lkn	kf	efp
PM groupe 1	101	155	3.10	-2.77	1.80	-0.195
PM groupe 2	158	279	3.29	-3.91	1.75	0.295
MJM groupe 1	105	286	3.18	-2.63	1.92	-0.18
MJM groupe 2	155	240	3.59	-4.36	2.01	1.35

TABLE 2 – Valeurs des paramètres non prescrits pour les stratégies de transfert uniforme. L’identifiant PM (resp. MJM) désigne le transfert uniforme médian (resp. optimal).

Performances Les scores de calage obtenus sur chacun de deux sous-groupes de bassin sont présentés sur la figure 18.

On constate que les performances sont dans l’ensemble moins bonnes pour le groupe 1 que pour le groupe 2, de manière assez surprenante puisque la répartition des bassins dans les groupes a été faite à partir des descripteurs physiques. La réduction du nombre de paramètres calés s’accompagne d’une diminution généralisée des performances. Elle est relativement contenue pour le KGE sur les débits avec une baisse moyenne comprise entre 5% et 10% pour les deux groupes. La diminution des performances est plus forte pour le KGE sur les régimes et les débits classés avec une baisse relative moyenne supérieure à 10% pour les deux groupes. Les performances de calage à 6 paramètres restent cependant bonnes dans l’ensemble avec des KGE médians supérieurs à 0.8 et entre 10% à 20% de performances plutôt moyennes selon le groupe de bassins et la signature hydrologique. La réduction du nombre de paramètres entraîne donc une baisse de performance limitée et s’avère pertinente comme première étape de l’expérience de régionalisation.

5.3.2 Validation

Paramétrisations Les méthodes de transfert de paramètres 1 et 2 ont été appliquées pour chaque groupe. Les valeurs obtenues pour les 6 paramètres à régionaliser sont présentées dans le tableau 2.

On constate que pour une même méthode, les paramètres déterminés sur les deux groupes sont

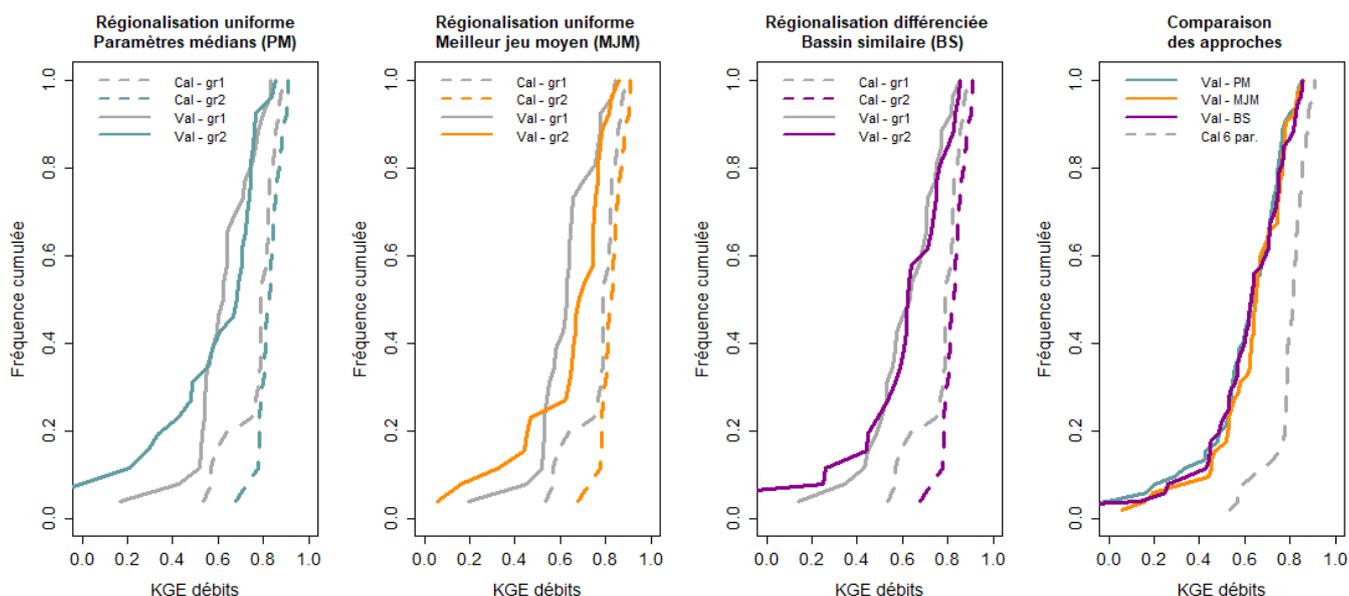


FIGURE 19 – Performances en validation des trois approches de régionalisation des paramètres évaluées avec le critère KGE sur les débits. Les résultats sont présentés pour chaque groupe de bassin. Les performances en calage à 6 paramètres sont également présentées à titre de comparaison.

relativement différents malgré la répartition des bassins de manière homogène. Cela questionne en partie le choix des descripteurs utilisés qui peuvent ne pas être suffisants pour caractériser les bassins du point de vue de leur fonctionnement hydrologique.

On voit également que pour chaque groupe les deux méthodes donnent des valeurs de paramètres relativement proches, à quelques exceptions près.

Performances Les résultats obtenus en validation avec les trois approches de transposition des paramètres sont présentés sur la figure 19.

Les performances sont variables selon la méthode de régionalisation et le groupe de bassins considéré. La proportion de mauvaises performances est plus importante pour le groupe 2 que pour le groupe 1, en particulier avec les approches de régionalisation uniforme. On peut expliquer ces différences de performance entre groupes de validation par la présence dans un des groupes d'un ou plusieurs bassins au fonctionnement particulier sans qu'un bassin au fonctionnement analogue ne soit présent dans l'autre groupe. Les paramètres issus du groupe de calage ayant la plus grande diversité de bassins seront à priori à même de fournir des performances acceptables en moyenne sur tous les bassins du groupe de validation. En revanche, les paramètres issus du groupe de calage ayant la moins grande diversité de bassins risquent de fournir des performances limitées sur des bassins particuliers du groupe de validation. Néanmoins, les écarts de performance en validation entre les deux groupes n'étant pas systématiques, on peut conclure qu'aucune des approches n'est invalidée par cette évaluation.

La comparaison des trois approches de régionalisation ne fait pas ressortir de classement clair en terme de rang des performances. Tous bassins confondus, les écarts sur le critère KGE entre les trois approches sont très faibles pour la majeure partie de plage de performances. C'est l'approche par régionalisation uniforme du meilleur jeu de paramètres moyen qui semble fournir les meilleures performances, en particulier pour les plus faibles valeurs du critère KGE. C'est également la seule

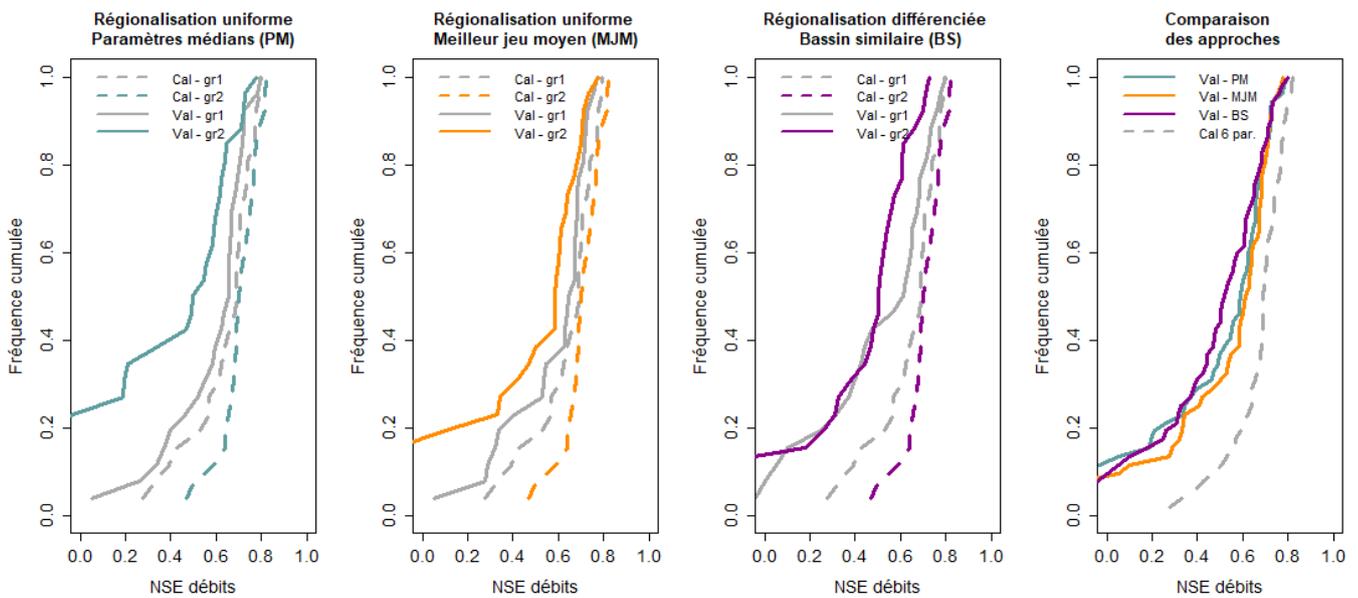


FIGURE 20 – Performances en validation des trois approches de régionalisation des paramètres évaluées avec le critère NSE sur les débits. Les résultats sont présentés pour chaque groupe de bassin. Les performances en calage à 6 paramètres sont également présentées à titre de comparaison.

approche pour laquelle le KGE minimal est supérieur à 0. Afin de confirmer cette tendance, les performances de chaque approche ont également été évaluées à l'aide du critère NSE. Les résultats sont présentés sur la figure 20.

On constate une différence marquée entre les performances des deux groupes en validation qui concerne quasiment toute la plage de valeurs du critère pour les approche de régionalisation uniforme. Tous bassins confondus, les écarts sur le critère NSE entre méthodes de régionalisation sont plus importants que sur le critère KGE. L'approche par régionalisation uniforme du meilleur jeu de paramètre moyen donne clairement les meilleurs résultats. A contrario, l'approche par transposition des jeux de paramètres entre bassins similaires semble être la moins performante. Sur la base des critères KGE et NSE, on retient l'approche de régionalisation par transposition uniforme du meilleur jeu de paramètre moyen comme technique de régionalisation.

5.4 Discussion

5.4.1 Nombre de paramètres calés

On a vu que la réduction du nombre de paramètres calés s'accompagnait d'une baisse des performances en calage. Dans une optique de régionalisation, tous les paramètres pour lesquels on dispose d'une méthode de calcul à partir de variables descriptives ont été prescrits. On peut cependant questionner ce choix dans la mesure où les formulations utilisées pour calculer les paramètres ont été validées sur un nombre réduit de bassins et peuvent donc atteindre leurs limites sur notre échantillon. Un paramètre prescrit peut alors amoindrir la capacité de l'algorithme de calage à déterminer un jeu de paramètre informatif. La régionalisation de ce jeu de paramètres peut alors s'avérer moins performante que si le paramètre prescrit problématique avait été calé. On a montré en 5.3.1 que les valeurs prescrites pouvaient être très éloignées des valeurs issues du calage, ce qui peut interroger sur leur pertinence.

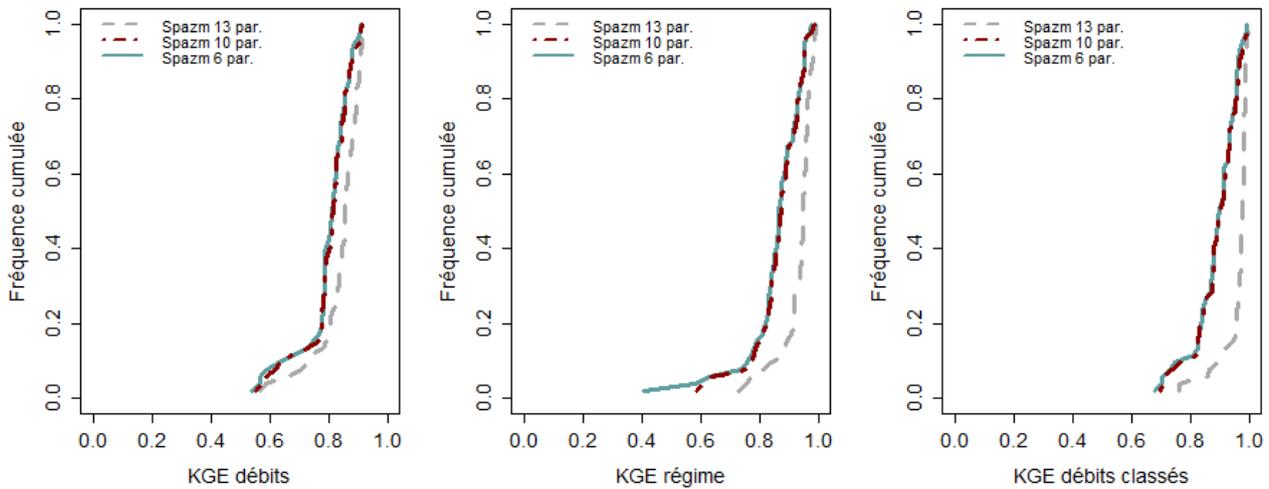


FIGURE 21 – Performances en calage à 13, 10 et 6 paramètres libres sur les 52 bassins utilisés dans l’expérience de régionalisation. Les performances sont évaluées avec le critère KGE sur trois signatures hydrologiques.

Afin d’explorer cette problématique, une expérience de calage supplémentaire a été menée en prescrivant uniquement les paramètres gpz , eft et cp . Concernant gpz , on sait que par construction du forçage de précipitation Spazm, le gradient altitudinal est représentatif de la réalité. Pour eft , c’est le paramètre du module neige qui présente la plus faible sensibilité et la moins bonne identifiabilité, il a été montré que sa prescription à 0 est valide. Enfin, on décide de ne pas caler cp . Les résultats sont présentés sur la figure 21. Les performances de calage à 10 paramètres libres sont quasiment identiques à celles obtenues avec le calage à 6 paramètres libres, et ce pour les trois signatures hydrologiques analysées. On constate uniquement une amélioration de la moins bonne performance sur le régime. On en conclut que les formulations utilisées pour prescrire les paramètres cel , dif , kr et gtz sont valides sur notre échantillon puisqu’elles n’entraînent pas une diminution des performances. On maintient donc l’approche de régionalisation par transfert uniforme des 6 paramètres non prescriptibles.

Une expérience supplémentaire (résultats non présentés) a montré que la dégradation des performances de calage est majoritairement liée à la prescription du paramètre cp . En calant les 6 paramètres non prescriptibles ainsi que cp , on retrouve des performances très légèrement inférieures à celles obtenues en calant 13 paramètres. Le calage de cp pose cependant problème pour la régionalisation. La sensibilité de la fonction objective à ce paramètre étant très forte, le choix du jeu de paramètres donnant la meilleure performance moyenne risque d’être fortement conditionné à la valeur de cp , les autres paramètres n’ayant qu’un rôle limité. Pour éviter cet écueil, on conserve la solution consistant à fixer cp à sa valeur moyenne issue des calages précédents sur le domaine spatial étudié.

5.4.2 Évaluation de la similitude entre bassins

Les résultats de validation montrent que l’approche de régionalisation par transfert des paramètres du bassin le plus proche (au sens de la fonction de similitude) n’est pas pertinente pour la majorité des bassins. On peut y apporter deux explications :

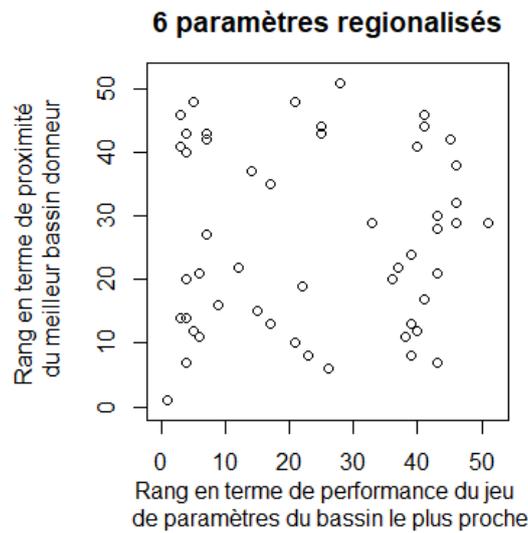


FIGURE 22 – Comparaison des rangs en terme de performance de simulation et de proximité des bassins donateurs. Chaque point représente un bassin et permet d’estimer le lien entre proximité du bassin donneur et performance de son jeu de paramètres.

- La contrainte imposée par les paramètres fixés limite les possibilités d’obtenir un jeu de paramètres réellement représentatif du fonctionnement simulé du bassin. Ainsi pour deux bassins proches au sens de la fonction de similitude (si on fait l’hypothèse qu’elle traduit effectivement une similarité en terme de paramétrisation), si les paramètres calculés prennent des valeurs relativement éloignées, les paramètres calés seront à priori également différents. Les résultats de calage à 10 paramètres ont cependant montré que la prescription des paramètres pouvait être validée.
- Les variables utilisées pour décrire la similitude entre bassins ne sont pas pertinentes pour expliquer la similitude des paramétrisations.

Cette dernière explication semble la plus probable, dans la mesure où la forte paramétrisation de MORDOR limite l’identifiabilité des paramètres. Pour le vérifier, on a comparé sur chaque bassin les rangs en terme de performance de simulation et de proximité des bassins donateurs. On constate que sur l’ensemble des bassins, il n’y a aucune corrélation entre ces rangs, comme présenté sur la figure 22. Aucune corrélation n’a non plus été trouvée entre les composants individuels de la fonction de proximité et les performances de simulation. L’évaluation de la proximité entre bassins à l’aide de ces critères n’est donc pas pertinente en regard de nos objectifs.

Une deuxième approche a été testée en évaluant la proximité entre bassins en terme de paramétrisation du modèle, l’hypothèse étant que des bassins pour lesquels les paramètres prescrits sont similaires partagent à priori des traits de fonctionnement hydrologique communs. Les résultats (non présentés ici) sont équivalents à ceux obtenus avec la fonction de similarité basée sur les descripteurs physiques de bassin. Les paramètres calculés ne sont donc pas pertinents pour évaluer la proximité en terme de performance de simulation.

l_{max}	zu_{max}	evl	lkn	kf	efp
105	286	3.18	-2.63	1.92	-0.18

TABLE 3 – Jeu de 6 paramètres régionalisés pour les simulations avec le forçage de précipitation Spazm.

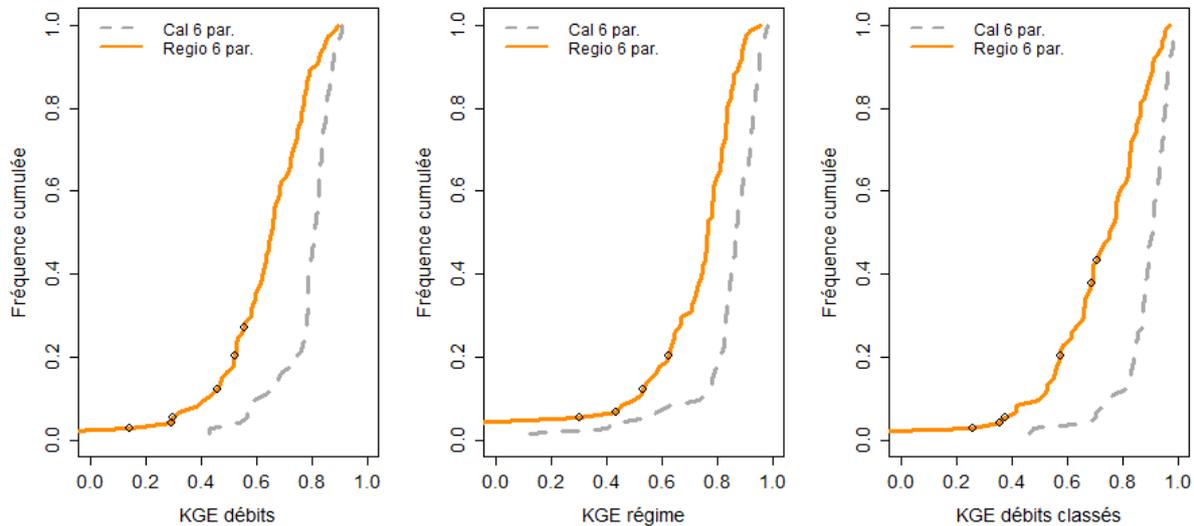


FIGURE 23 – Performances de simulation sur les bassins jaugés non glaciaires avec le jeu de paramètres régionalisé final associé au forçage de précipitation Spazm. Les cercles noirs identifient les performances des 7 bassins exclus pour le calage de la méthode de régionalisation, les critères sont inférieurs à 0 pour certains.

5.5 Approche de régionalisation finalisée

Les différentes expériences menées afin d’aboutir à une stratégie de régionalisation des 21 paramètres (hors module glace) de MORDOR-SD ont permis de définir la méthode suivante :

- 10 paramètres sont prescrits uniformément à partir de valeurs issues de la littérature ou d’expertise du modèle.
- 5 paramètres propres à chaque bassin sont calculés à partir de descripteurs physico-climatiques.
- 6 paramètres sont régionalisés selon la méthode de transfert uniforme optimal.

Pour obtenir ce jeu de 6 paramètres, les calages ont été effectués sur les 74 bassins versants jaugés sans contribution glaciaire avec le forçage de précipitation Spazm sur la durée maximale de disponibilité des données de débit. Les 7 bassins donnant les moins bonnes performances sur les critères KGE et NSE (soit 10 % de l’échantillon) sont écartés afin de ne pas introduire des jeux de paramètres non informatifs. Le jeu de 6 paramètres calés donnant la meilleure performance moyenne sur 67 bassins est donné dans le tableau 3.

Les débits ont ensuite été simulés sur les 74 bassins sur la période 1959-2017 en combinant les paramètres prescrits et les paramètres régionalisés. Les critères ont été calculés sur la période maximale de disponibilité des données de débit observé. Les performances de simulation sont présentées sur la figure 23.

On constate que les performances des bassins qui n’ont pas servi à l’identification du jeu de paramètres régionalisés sont généralement parmi les moins bonnes. En particulier, les 4 plus mauvaises performances en régionalisation sur chaque signature hydrologique sont produites par ces bassins.

L'utilisation d'un jeu de paramètres régionalisé entraîne une diminution moyenne des performances de 22% sur les débits, 13% sur les régimes et 18% sur les débits classés. On note néanmoins que les performances restent généralement bonnes pour plus de la moitié des bassins, avec des KGE médians autour de 0.75 pour les régimes et les débits classés et 0.65 pour les débits.

5.6 Régionalisation avec les précipitations Comephore

L'utilisation des précipitations Spazm pour la mise au point de l'approche de régionalisation était principalement motivée par la plus grande confiance accordée aux cumuls de précipitation fournis par Spazm par rapport à ceux de Comephore. De plus, une approche de régionalisation basée sur les précipitations Spazm nous permet de simuler les débits sur n'importe quel bassin versant du domaine d'étude sur la période 1948-2017.

La comparaison des performances du modèle avec les deux forçages de précipitation lors des expériences de calage-validation a cependant montré que Spazm désagrégé était limité dans sa capacité à fournir une information horaire adaptée pour modéliser les événements de crues, en particulier sur les plus petits bassins de l'échantillon. On peut donc supposer que la préconisation des paramètres contrôlant la cinétique des écoulements, à savoir *cel*, *dif* et dans une moindre mesure *kr*, ainsi que la réduction du nombre de paramètres calés de 13 à 6 n'ont pas eu un impact significatif sur des performances qui était déjà relativement faibles.

L'approche de régionalisation a donc été mise en oeuvre avec les précipitations Comephore sur l'échantillon de 52 bassins versants pour évaluer dans quelle mesure les performances évoluaient, d'abord en calage en réduisant le nombre de paramètres, puis en validation (pseudo non-jaugé) en transférant uniformément le jeu de paramètres donnant la meilleure performance moyenne sur les bassins ayant servi au calage des 6 paramètres.

Les biais existants sur les précipitations Comephore étant relativement élevés, on a choisi dans un premier temps de caler le paramètre *cp*. De cette manière, on évite que les autres paramètres ne prennent des valeurs aberrantes pour corriger les biais. Les distributions obtenues pour ces paramètres peuvent alors servir de référence pour un calage avec *cp* fixé. Contrairement à Spazm, les biais des précipitations annuelles totales Comephore présentent une nette organisation spatiale (voir Fig. 12) qui peut être exploitée car elle est liée à une sous-estimation identifiée des précipitations sur des zones mal couvertes par les radars (Roger, 2017). Afin de régionaliser le paramètre *cp* avec les précipitations Comephore, nous proposons de conserver l'hypothèse d'un biais sur les précipitations Spazm uniforme spatialement et d'exploiter le rapport des cumuls annuels moyens de précipitation Spazm et Comephore comme présenté dans l'équation suivante :

$$cp_i = \frac{P_{Spazm,i}}{P_{Comephore,i}} * 0.9, \quad (6)$$

avec $P_{Spazm,i}$ (resp. $P_{Comephore,i}$) le cumul interannuel moyen de précipitation Spazm (resp. Comephore) du bassin i . Le coefficient 0.9 permet de prendre en compte le biais moyen de Spazm sur la zone d'étude. L'équation 6 permet d'obtenir une estimation du paramètre *cp* partout où les précipitations Comephore sont disponibles.

Les résultats en calage sont présentés sur la figure 24. Comme avec le forçage Spazm, on constate que la perte de performance sur les trois signatures hydrologiques en réduisant le nombre de paramètres calés est majoritairement liée à l'utilisation d'une valeur de *cp* fixée. La diminution relative des performances est plus importante qu'avec le forçage Spazm, ce qu'on peut attribuer aux plus forts

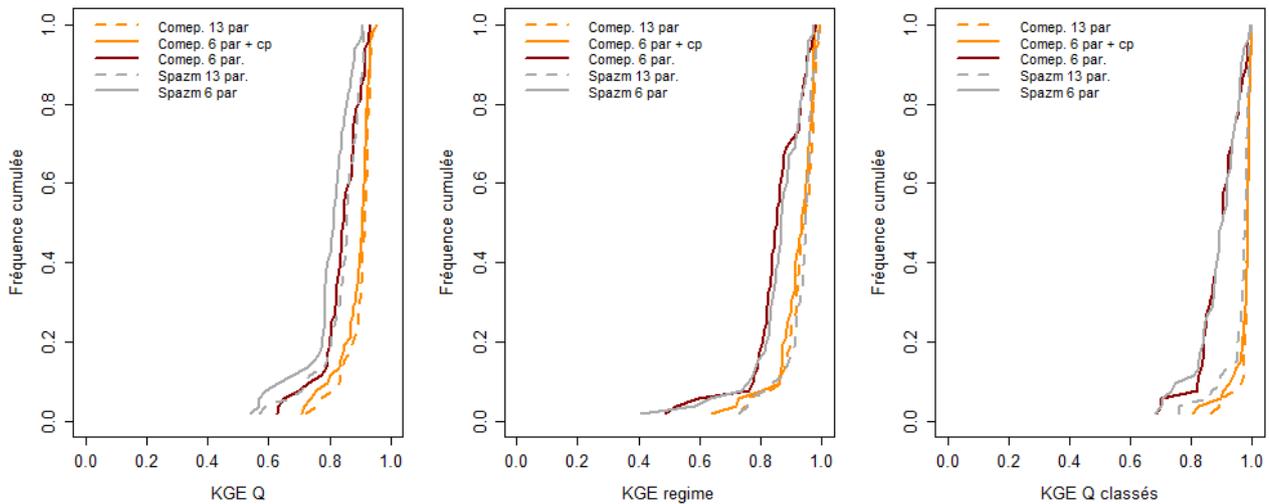


FIGURE 24 – Évaluation avec le critère KGE sur trois signatures hydrologique des performances de différents calages sur les 52 bassins de mise au point de la régionalisation.

l_{max}	zu_{max}	evl	lkn	kf	efp
135	298	2.83	-3.00	1.91	-0.15

TABLE 4 – Jeu des 6 paramètres régionalisés pour les simulations avec le forçage de précipitation Comephore.

biais existants sur les cumuls Comephore. Les performances du calage à 6 paramètres avec Comephore sont similaires à celles du calage à 6 paramètres avec Spazm pour le KGE sur les régimes et les débits classés. Elles sont en revanche meilleures pour le KGE sur les débits où elles s’approchent des performances de calage à 13 paramètres avec Spazm. L’analyse de la décomposition du KGE sur les trois signatures hydrologiques montre que la perte de performance est majoritairement due à la dégradation du biais de moyenne. Ces résultats confirment l’impact très réduit de la préconisation des paramètres autres que *cp* sur les performances du modèle.

Le jeu de paramètres donnant la meilleure performance moyenne sur les 52 bassins est présenté dans le tableau 4.

Les performances en simulation avec ce jeu de paramètres ont ensuite été évaluées sur les 56 bassins versants qui disposent d’au moins 5 ans de données de débit observé sur la période 1997-2017. Les résultats sont présentés sur la figure 25.

Les performances sont nettement meilleures avec Comephore pour le critère KGE sur les débits avec un écart moyen d’environ 10%. Les performances avec Comephore sont également meilleures pour les régimes mais l’écart moyen sur le KGE est beaucoup plus faible, de l’ordre de 3%. Pour le KGE sur les débits classés l’écart moyen est proche de 0, les simulations avec Spazm se démarquant par un nombre très contenu de mauvaises performances. La comparaison des résultats sur chaque bassin montre que les écarts de score entre les deux forçages peuvent être très importants. Pour essayer de mieux identifier les raisons de ces différences de performance, les trois composantes du KGE ont été analysées séparément. Les résultats pour le KGE sur les débits sont présentés sur la figure 26.

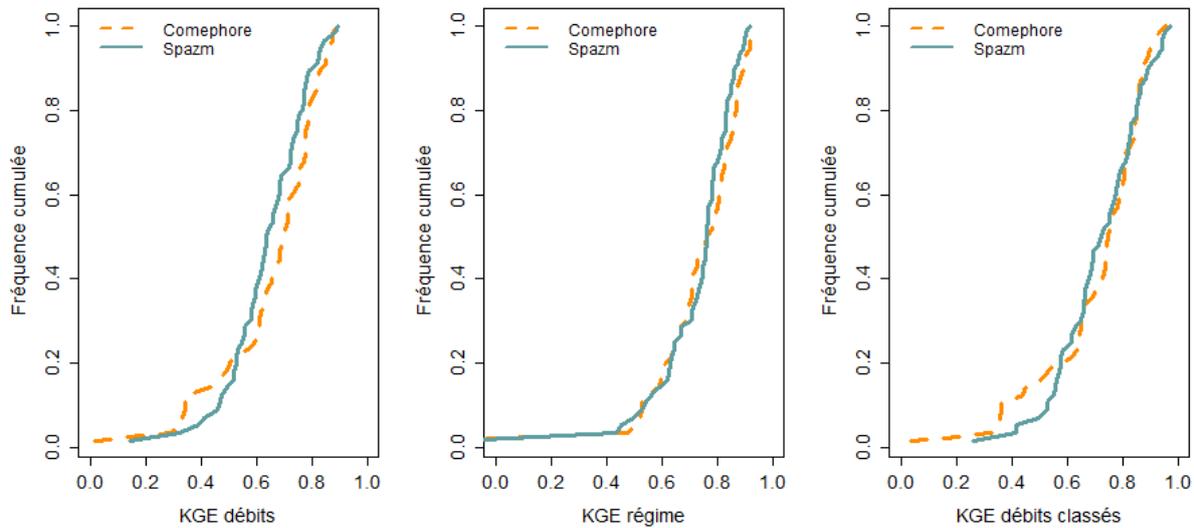


FIGURE 25 – Résultats de simulation avec les jeux de paramètres régionalisés optimaux sur 56 bassins versants jaugés avec les forçages de précipitation Spazm et Comephore. Les performances sont évaluées avec le critère KGE sur trois signatures hydrologiques.

Par construction du paramètre cp régionalisé pour Comephore, le cumul de précipitation Comephore corrigé en entrée du modèle est égal au cumul Spazm corrigé du coefficient uniforme $cp = 0.9$. Il est donc normal que le biais de moyenne b_{moy} soit identique avec les deux forçages de précipitation. Le coefficient de corrélation r est meilleur avec Comephore de 10% en moyenne. Cela confirme la capacité de Comephore à fournir une information de précipitation horaire de meilleure qualité dont découle une meilleure reproduction de la dynamique des débits. Le biais de variance b_{var} médian avec Comephore est égal à 1 ce qui traduit un bon équilibre entre les bassins où la variance est sous-estimée et ceux où la variance est sur-estimée. L'utilisation du forçage Spazm se traduit par un plus grand nombre de bassins pour lesquels la variance est sous-estimée, ce qui s'explique principalement par les difficultés de reproduction de la forme des hydrogrammes de crues avec ce forçage. On constate également des biais de variance supérieurs à 1.5 pour environ 10 % des bassins avec Comephore qui ne se produisent pas avec Spazm. Ces bassins présentent également des biais de moyenne parmi les plus élevés. Ils sont caractérisés par des cp calculés supérieurs à 1 et des cp calés compris entre 0.9 et 1. Les précipitations sont donc corrigés à la hausse alors que le bilan simulé est excédentaire. Les précipitations Comephore présentant une variance plus élevée que Spazm, leur correction à la hausse entraîne une surestimation des intensités de précipitation fortes qui se traduit par une surestimation des débits élevés.

6 Conclusions

Le modèle hydrologique MORDOR-SD a été calé sur 79 bassins versants jaugés des Alpes du Nord aux caractéristiques physiques variées. On ne constate aucune mauvaise performance du modèle en calage ce qui indique sa capacité à reproduire une grande variété de fonctionnements hydrologiques. Les deux forçages de précipitation utilisés ont chacun montré leurs avantages et limites. Les précipitations Comephore ont comme intérêt principal de mieux représenter la dynamique des averses au pas de temps horaire, ce qui se traduit par des performances du modèle significativement meilleures

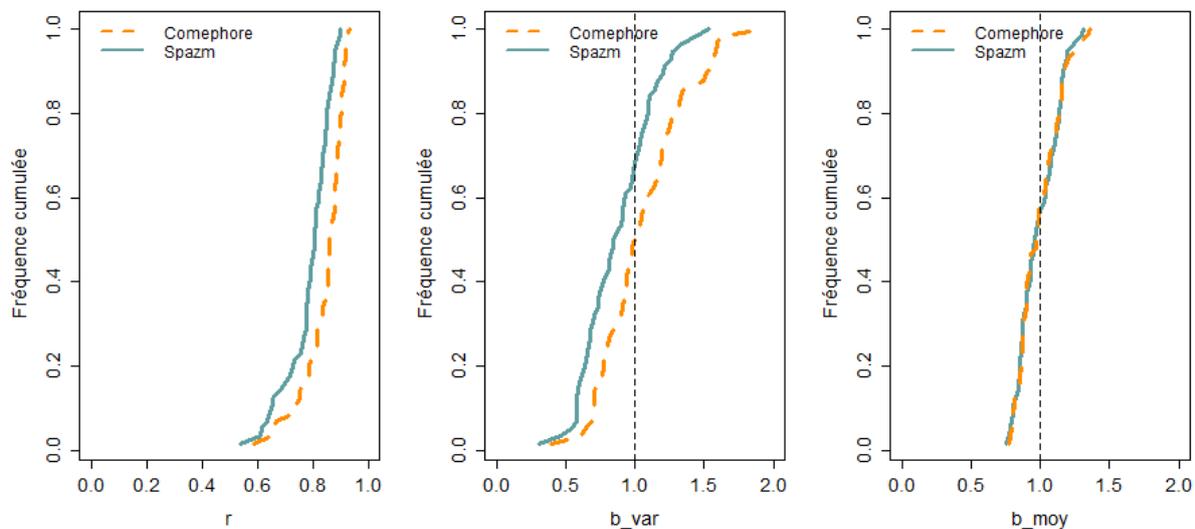


FIGURE 26 – Décomposition du critère KGE sur les débits simulés en régionalisation pour 56 bassins versants jaugés avec les forçages de précipitation Spazm et Comephore.

qu'avec le forçage Spazm désagrégé.

Une méthode de régionalisation simple des paramètres du modèle a été mise au point. Les performances obtenues en appliquant cette méthode sur les bassins jaugés sont fortement dégradées par rapport aux performances en calage. L'incertitude sur les précipitation (biais de volume) et l'incapacité qui en découle à reproduire le bilan hydrologique des bassins explique en grande partie cette dégradation. La difficulté à régionaliser certains paramètres clés du bilan hydrologique dans MORDOR-SD (paramètres cp et $csbv$) reste à résoudre pour obtenir un modèle régionalisé performant sur ces petits bassins versants.

Appendices

A Estimation du paramètre $csbv$

La procédure est présentée dans la figure 27.

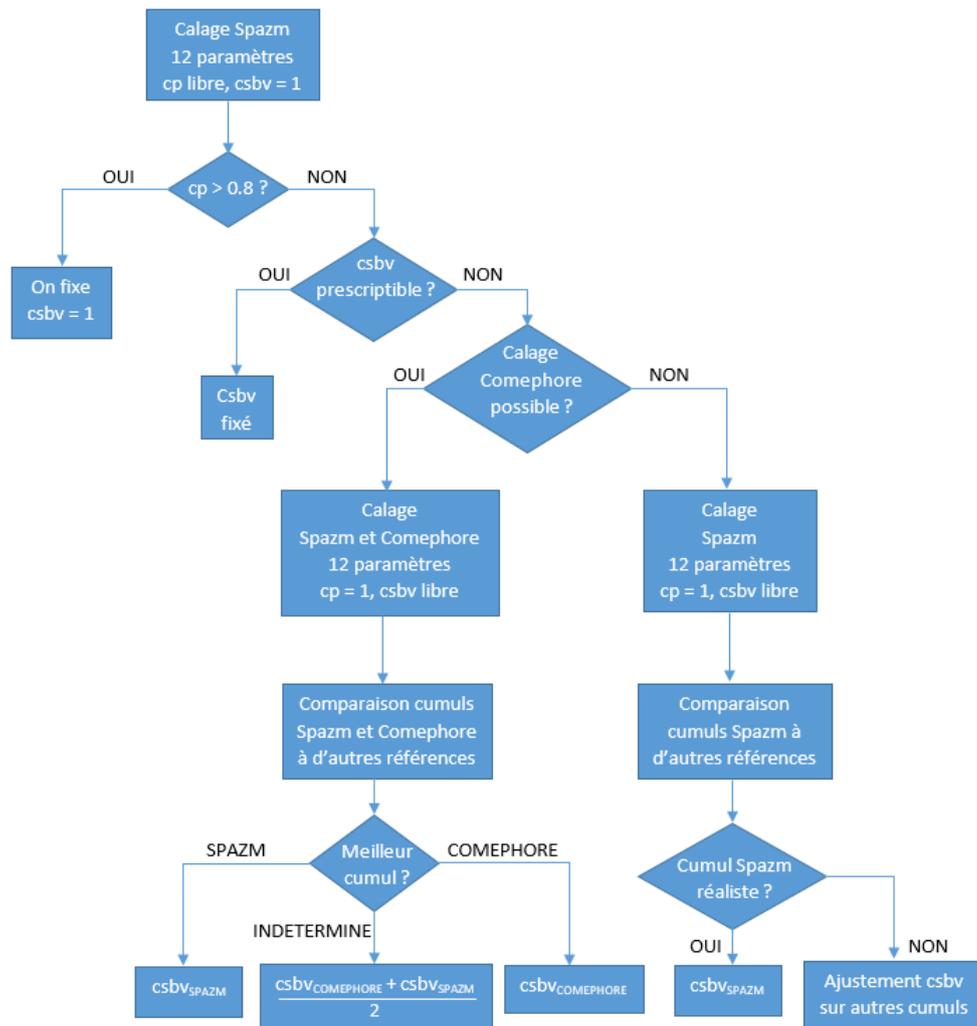


FIGURE 27 – Procédure d’estimation du paramètre $csbv$ sur les bassins jaugés.

A l’issue de la première étape, on fixe $csbv = 1$ sur les bassins pour lesquels $cp > 0.8$. L’hypothèse sous-jacente est qu’on considère que les cumuls de précipitation Spazm peuvent présenter un biais positif maximal de 20%. Pour les bassins où $cp < 0.8$, on estime que l’erreur sur le bilan hydrologique n’est pas attribuable uniquement au biais de précipitation. Si les bassins ont fait l’objet d’études hydrogéologiques, il est possible de trouver des estimations des surfaces d’impluviums réels, auquel cas la valeur de $csbv$ peut être fixée. Dans le cas contraire, on effectue un calage en faisant l’hypothèse que le biais sur les précipitations est nul (soit $cp = 1$) et en utilisant uniquement $csbv$ pour corriger le bilan hydrologique. On compare ensuite les cumuls de précipitation interannuels bruts à plusieurs références pour déterminer quel forçage de précipitation est le plus pertinent. Les références utilisées sont les données Safran, les pluviomètres Météo-France (ou appartenant à d’autres réseaux d’observation)

ainsi que les estimations de précipitation de bassin qui peuvent être trouvées dans diverses études. Si le calage peut être effectué avec les précipitations Spazm et Comephore, c'est à dire si l'on dispose de données de débit sur la période 1997-2017, on choisit la valeur de $csbv$ issu du calage avec le forçage dont le cumul interannuel est le plus proche de la référence, ou une moyenne (éventuellement pondérée) de $csbv_{SPAzm}$ et $csbv_{COMEPHORE}$ si le choix de l'un ou l'autre des forçages n'est pas évident. En détail, les situations qui peuvent se présenter sont :

- Si $Pcum_{COMEPHORE} < Pcum_{SPAzm} < Pcum_{ref}$ ou $Pcum_{COMEPHORE} > Pcum_{SPAzm} > Pcum_{ref} \rightarrow csbv_{SPAzm}$
- Si $Pcum_{SPAzm} < Pcum_{COMEPHORE} < Pcum_{ref}$ ou $Pcum_{SPAzm} > Pcum_{COMEPHORE} > Pcum_{ref} \rightarrow csbv_{COMEPHORE}$
- Si $Pcum_{SPAzm} < Pcum_{ref} < Pcum_{COMEPHORE}$ ou $Pcum_{SPAzm} > Pcum_{ref} > Pcum_{COMEPHORE} \rightarrow \sigma_{COMEPHORE} * csbv_{COMEPHORE} + \sigma_{SPAzm} * csbv_{SPAzm}$ avec $\sigma_{COMEPHORE}$ et σ_{SPAzm} des poids

Quand le calage n'est possible qu'avec le forçage de précipitation Spazm et que ce dernier est trop éloigné des cumuls de comparaison, (+ ou - 20%) la valeur de $csbv_{SPAzm}$ issue du calage est ajustée pour traduire l'éventuel biais sur la précipitation.

Références

- BLÖSCHL, G. et SIVAPALAN, M. (1995). Scale issues in hydrological modelling : a review. *Hydrological Processes*, 9(3-4) :251–290.
- BRENOT, A. et Dupré la TOUR, J. (2010). Connaissance de l'hydrosystème et aide à la définition de la gestion de la ressource en eau sur le territoire des 4 vallées de Vienne. Phase 1 - Acquisition, mise en forme et analyse des données disponibles. Rapport d'avancement. BRGM/RP-59220-FR, BRGM.
- BURN, D. H. et BOORMAN, D. B. (1992). Catchment classification applied to the estimation of hydrological parameters at ungauged catchments. Rapport technique 143, Institute of Hydrology, Wallingford.
- 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).
- 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.
- 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. *La Houille Blanche*, 5 :71–76.
- GUPTA, H. V., KLING, H., YILMAZ, K. K. et MARTINEZ, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria : Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1) :80–91.
- 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.
- 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 : Désagrégation temporelle des réanalyses SPAZM. Rapport technique, INRAE - UR ETNA.
- MAS, A., EVIN, G., MOREL, M., PITON, G. et REVERDY, A. (2021). HYDRODEMO - Action 1 : État des lieux et recueil de l'information disponible concernant l'aléa torrentiel. Rapport technique, INRAE, Grenoble, France.
- 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.

- 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.
- LOUDIN, 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).
- PETEUIL, C., CARLADOUS, S. et MATHYS, N. (2010). La méthode ANETO : un outil pour la prédétermination des débits de crue des bassins versants torrentiels des Pyrénées françaises. Publisher : Irstea.
- PETEUIL, C., MATHYS, N., MARTIN, A. I., ZEGRAR, R., PORCHERON, D., RIESS, A. et CIPRIANI, T. (2011). 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, Rapport PGRN.
- PONCET, A. (1975). Réflexions sur la restauration des terrains en montagne pour une meilleure programmation. *Revue Forestière Française*, XXVII :362–370.
- RABATEL, A., DEDIEU, J. P. et VINCENT, C. (2016). Spatio-temporal changes in glacier-wide mass balance quantified by optical remote sensing on 30 glaciers in the French Alps for the period 1983–2014. 62(236) :1153–1166.
- ROGER, L. (2017). Validation et utilisation climatologiques de la ré-analyse de lame d'eau radar Comephore étendue. Stage de fin d'étude, Météo-France, Toulouse. 77 p.
- 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.
- 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.



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>