



HAL
open science

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

Loic Orillard, Juliette Blanchet, Mathieu Dode

► **To cite this version:**

Loic Orillard, Juliette Blanchet, Mathieu Dode. Projet HYDRODEMO Évaluation de l'aléa torrentiel dans les petits bassins versants des Alpes du Nord : Action 5 : Modélisation hydrologique pour l'analyse des concomitances de crues aux échelles intermédiaires. [Rapport de recherche] Université Grenoble - Alpes; CNRS; IGE. 2022. hal-03565934

HAL Id: hal-03565934

<https://hal.science/hal-03565934>

Submitted on 11 Feb 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.



Projet HYDRODEMO

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

Action 5 : Modélisation hydrologique pour l'analyse des concomitances de crues aux échelles intermédiaires

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

Action 5 : Modélisation hydrologique pour l'analyse des concomitances de crues aux échelles intermédiaires

Loïc Orillard¹, Juliette Blanchet¹, and Mathieu Dode¹

¹ *Univ. Grenoble Alpes, CNRS, IGE, 3800, Grenoble, France*

2 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.

Ce rapport est publié sous Licence Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

Citation : Orillard, L., Blanchet, J., Dode, M. 2022. *Projet HYDRODEMO - Action 5 : Modélisation hydrologique pour l'analyse des concomitances de crues aux échelles intermédiaires* [Rapport de Recherche] IGE

Résumé

L'objectif de cette action est d'utiliser un modèle pluie-débit journalier distribué couvrant la bassin versant de l'Isère en amont de Grenoble pour étudier l'occurrence des crues aux échelles intermédiaires et leur coordination, pour une gamme importante de périodes de retour (1 à 100 ans). L'étude se base sur le modèle hydrologique distribué MORDOR-TS.

Dans une première partie, nous étudions la concomitance en débit ruisselé à l'échelle journalière au sein des bassins de l'Isère à Grenoble et du Drac à Fontaine, sur la période 1998-2017. Les résultats montrent que les concomitance des forts débits ruisselés se font préférentiellement parallèlement au relief. Les fortes concomitances ont lieu surtout sur les premiers grands massifs susceptibles de bloquer les flux, alors que les massifs internes voient des concomitances moins importantes. Pour les fortes précipitations, on observe des concomitances beaucoup plus isotropes que pour les forts débits ruisselés, beaucoup plus étendues et beaucoup plus homogènes spatialement au sein des bassins. L'étude de la concomitance torrent-rivière a de plus révélé que ce sont les torrents des plus hauts massifs qui réagissent le plus fréquemment de manière concomitante aux rivières en hautes-eaux. Les rivières en hautes-eaux sont donc produits par des systèmes précipitants large échelle, c'est-à-dire touchant quasiment tout le bassin versant.

Dans une deuxième partie, on a utilisé le générateur stochastique RAINSIM pour étudier les concomitances à des niveaux non observé sur le bassin de l'Isère. L'étude de la concomitance en débit ruisselé à partir de 330 années de simulation (en climat stationnaire) a révélé que RAINSIM avait tendance à faire des concomitances en fortes précipitations plus étendues que SPAZM, bien que de même direction préférentielle et répartition spatiale. Bizarrement, il en résulte une concomitance en débit moins étendue qu'avec SPAZM. En allant à des niveaux plus élevées, on retrouve des concomitances de plus en plus locales, ce qui signifie que les crues les plus extrêmes sont aussi les plus locales (idem pour les précipitations).

Remerciements

Nous tenons à remercier tous les acteurs qui ont contribué à l'aboutissement de cette étude :

- Emmanuel Paquet et Mathieu Le Lay d'EDF-DTG pour leur aide technique et méthodologique ainsi que leur réactivité ;
- Jean-Dominique Creutin, Antoine Blanc, Alix Reverdy, Jules Boulard et Périne Kiennemann de l'IGE pour les travaux ayant précédé cette étude et/ou l'ayant nourri durant son développement.
- Bertrand Marion et Céline Thomas de Grenoble Alpes Métropole ainsi que Anne-Sophie Drouet et Claire Godayer du Symbhi pour le suivi de ces travaux et leurs questions avisées ;
- L'ensemble des acteurs internes et externes du projet HYDRODEMO pour les retours constructifs tout au long de la construction de notre étude
- Le personnel technique et administratif de l'IGE pour le support indispensable à la recherche.

Table des matières

Remerciements	4
1 Introduction	7
1.1 Le projet HYDRODEMO	7
1.2 Pourquoi l'Action 5 : Modélisation hydrologique pour l'analyse des concomitances de crues aux échelles intermédiaires?	8
2 Utilisation du modèle hydrologique MORDOR-TS sur l'Isère et le Drac	9
2.1 Le modèle MORDOR-TS	9
2.2 MORDOR-TS pour l'Isère et le Drac	9
2.3 Calage du modèle MORDOR-TS	12
2.4 Utilisation du modèle MORDOR-TS avec COMEPHORE : normalisation des cumuls annuels	14
2.5 Comparaison des performances de MORDOR-TS avec SPAZM et COMEPHORE	17
2.6 Comparaison de l'ordre de grandeur des performances MORDOR-TS / MORDOR-SD avec SPAZM et COMEPHORE	18
3 Coordination des crues passées, à l'aide de SPAZM et COMEPHORE	20
3.1 Étude de la concomitance torrent-torrent	20
3.1.1 Sélection des événements forts	20
3.1.2 Graphe de concomitance torrent-torrent	21
3.1.3 Comparaison à la concomitance en précipitation	22
3.1.4 Étude de la concomitance à l'échelle locale	26
3.1.5 Pourquoi les concomitances en débit produit et en précipitation diffèrent-elles?	26
3.2 Étude de la concomitance rivière-torrent	27
3.2.1 Probabilité de concomitance	27
3.2.2 Potentialité de concomitance	30
4 Utilisation du générateur stochastique de pluie RAINSIM	34
4.1 Limites de l'analyse des concomitances à partir de réanalyses	34
4.2 Le simulateur de pluie RAINSIM	34
4.3 Choix de la zone d'étude : l'Isère à Grenoble	35
4.4 Choix des stations pluviométriques sur la zone d'étude	35
4.5 Étude de la pluviométrie sur le bassin	35
4.5.1 Saison à risque hydrologique	35
4.5.2 Pluviométrie par saison et type de temps	35
4.5.3 Répartition spatiale de la pluviométrie par saison et type de temps	38
4.6 Mise en place opérationnelle	40
4.6.1 Choix des saisons	40
4.6.2 Regroupement des types de temps	44
4.6.3 Choix des modèles de corrélation	45
4.6.4 Couplage au modèle pluie-débit MORDOR-TS	45
5 Performances du simulateur de pluie RAINSIM sur l'Isère	46
5.1 Performances locales de la simulation en multi-site	46
5.2 Performances locales de la simulation en champ de pluie	47
5.3 Performances de la simulation en champ de pluie sur le bassin	48
5.4 Performances en hydrologie	49

5.5	Adaptation du cumul RAINSIM pour la simulation hydrologique	52
5.6	Performances de la correction en hydrologie	54
6	Étude de la concomitance torrent-torrent pour des périodes de retour non observées, à l'aide de RAINSIM	57
7	Conclusion	61
	Bibliographie	63

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).

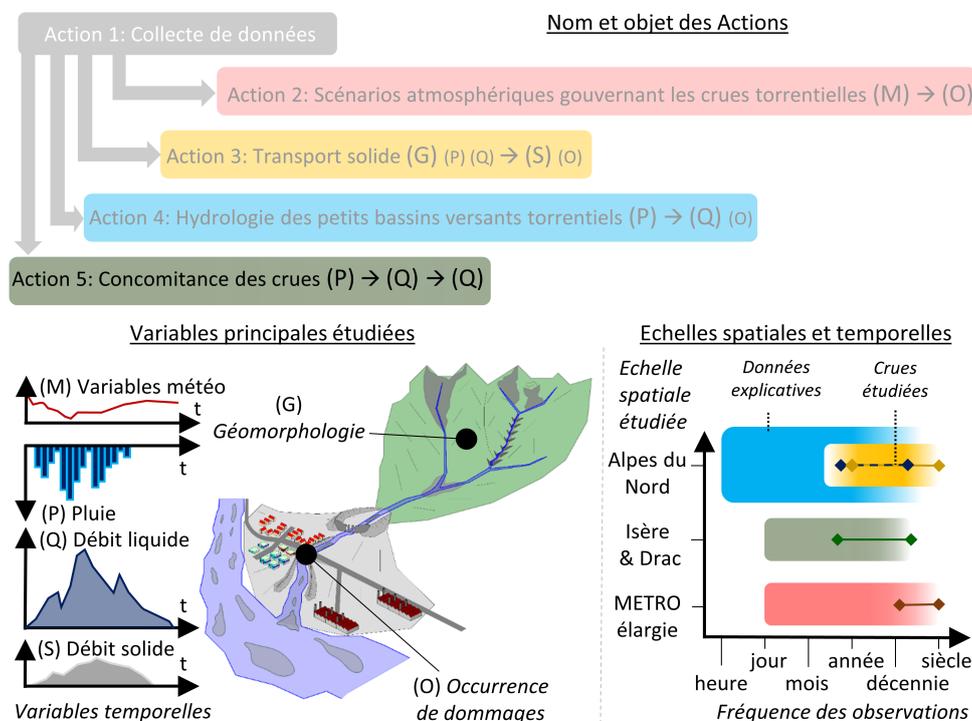


FIGURE 1 – Organisation générale des Actions du projet HYDRODEMO

- **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**, vise à développer un cadre de modélisation hydrologique pour les bassins versants torrentiels des Alpes du Nord ;
- **L’Action 5**, objet du présent rapport, 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.

Cette nouvelle connaissance scientifique permettra à l'avenir de mieux comprendre les phénomènes associés aux aléas torrentiels, de mieux les prévenir et d'améliorer l'alerte à la population.

1.2 Pourquoi l'Action 5 : Modélisation hydrologique pour l'analyse des concomitances de crues aux échelles intermédiaires ?

A l'échelle d'un territoire comme le bassin de l'Isère, divers types de crues peuvent se réaliser – de manière concomitante ou non – à différentes échelles spatiales et temporelles. A grande échelle (plusieurs milliers de km²), les grands cours d'eau (Isère, Drac, Romanche) réagissent à des situations de perturbation météorologique synoptiques capables de produire des cumuls pluri-journaliers de pluie extrêmes sur un vaste domaine. A petite échelle (moins de 10 km²), les têtes de bassins torrentiels réagissent à des situations orageuses très locales produisant des intensités pluviométriques localement extrêmes sur quelques heures au plus. Aux échelles intermédiaires (100 à 1000 km²) les affluents des grands axes peuvent réagir de manière coordonnée à des systèmes convectifs de méso-échelle associées par exemple à des retours d'est. Dans tous les cas, les crues catastrophiques paraissent précédées par un cumul pluviométrique mensuel extraordinaire et, éventuellement, par la fonte du manteau neigeux.

L'objectif de cette action est d'utiliser un modèle pluie-débit journalier distribué couvrant la bassin versant de l'Isère en amont de Grenoble pour étudier l'occurrence des crues aux échelles intermédiaires et leur coordination, pour une gamme importante de périodes de retour (1 à 100 ans). L'étude se base sur le modèle hydrologique distribué MORDOR-TS, développé par EDF-DTG [Rouhier, 2018], qui a été calibré sur les réanalyses SPAZM [Gottardi et al., 2012] et qui est utilisé ici en version continue. Dans cette action, il est alimenté par 3 produits pluviométriques différents, possédant chacun ses avantages et inconvénients : i) les réanalyses SPAZM, ii) les réanalyses radar COMEPHORE (après débiaisage en volume), iii) les champs de pluie simulés par le simulateur stochastique de précipitation journalière, RAINSIM, développé par IGE/EDF [Vaithinada Ayar et al., 2020]. L'objectif est :

- d'une part d'étudier la coordination des concomitances de crues passées aux échelles intermédiaires à partir des deux réanalyses SPAZM et COMEPHORE,
- d'autre part d'évaluer la capacité du modèle alimenté par le simulateur de pluie RAINSIM à reproduire la fréquence d'occurrence des concomitances de crues et de mieux comprendre leur coordination, notamment pour des périodes de retour non observées.

2 Utilisation du modèle hydrologique MORDOR-TS sur l'Isère et le Drac

2.1 Le modèle MORDOR-TS

Le modèle pluie-débit utilisé pour cette étude est le modèle conceptuel MORDOR-TS [Rouhier, 2018]. Il s'agit d'une version totalement spatialisée (TS) du modèle semi-distribué (SD) MORDOR-SD [Garavaglia et al., 2017] largement utilisé pour des applications opérationnelles à Électricité de France. Dans cette version, le bassin versant est divisé en plusieurs entités hydrologiques, c'est-à-dire des sous-bassins élémentaires, connectés selon le réseau hydrographique. Chaque entité hydrologique est elle-même découpée en bandes d'altitude. A chaque pas de temps quotidien le modèle (i) calcule indépendamment la production d'eau de chaque entité indépendamment et (ii) achemine toute la production vers les points de simulation, qui peuvent être n'importe quel exutoire d'entité 2.

Le module de production a pour objectif de quantifier les échanges entre les différentes composantes du cycle hydrologique. En se basant sur des données de précipitations et de température de l'air, six composants conceptuels de stockage interconnectés évoluent et alimentent le réseau hydrographique. Comme décrit dans la Figure ci-dessous, sa structure est constituée de six composants de stockage : un stockage U superficiel, un stockage L intermédiaire, un stockage N profond, un stockage Z évaporant, un stockage S nival et un stockage G glaciaire. Puisque le module est appliqué à chaque maille hydrologique, autant de contributions de ruissellement sont estimées.

Le module de routage est conçu pour propager les contributions au ruissellement de toutes les mailles vers les autres mailles à travers le réseau hydrographique. Il combine les transferts intra-maillles et inter-maillles au moyen d'une formulation basée sur le modèle d'onde diffusif 1D, avec une célérité et une diffusion indépendantes de l'écoulement du ruissellement. Dans sa formulation complète, MORDOR-TS comporte 22 paramètres libres. A chaque maille est attribuée un jeu de 22 paramètres, ce qui permet de spatialiser les paramètres.

2.2 MORDOR-TS pour l'Isère et le Drac

Deux modèles MORDOR-TS différents ont été calés par la Division Technique Générale (DTG) d'EDF, l'un pour l'Isère à Grenoble et l'autre pour le Drac à Fontaine. Le découpage temporel est au pas de temps journalier et le découpage géographique fonctionne par entité hydrologique tel qu'illustré à la Figure 3.

Le bassin versant de l'Isère ayant son exutoire à Grenoble est découpé en 245 entités hydrologiques (247 avec les entités 246 et 247 au Mont Cenis, mais celles-ci sont exclues systématiquement des calculs car leur exutoire réel se trouve en Italie et non dans l'Isère). Pour le Drac avec son exutoire à Fontaine, il est découpé en 126 entités hydrologiques. Les points blancs visibles sur les cartes de la Figure 3 représentent la localisation de points de simulation de débit journalier. En chacun de ces points, nous disposons de séries journalières de mesures (des données peuvent être manquantes). Certaines caractéristiques statistiques concernant la distribution de la surface et de l'altitude des entités hydrologiques au sein des bassins versants de l'Isère et du Drac sont tracées sur la Figure 4.

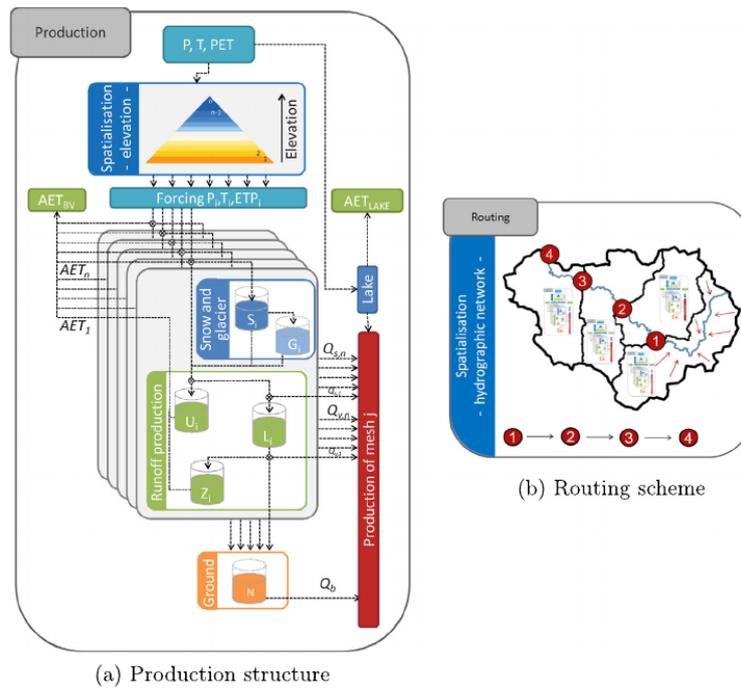


FIGURE 2 – Principe du modèle MORDOR-TS : (a) le module de production utilisé pour chaque entité hydrologique, (b) le schéma de routage intra- et inter-entités hydrologiques. Figure extraite de Rouhier et al. [2017].

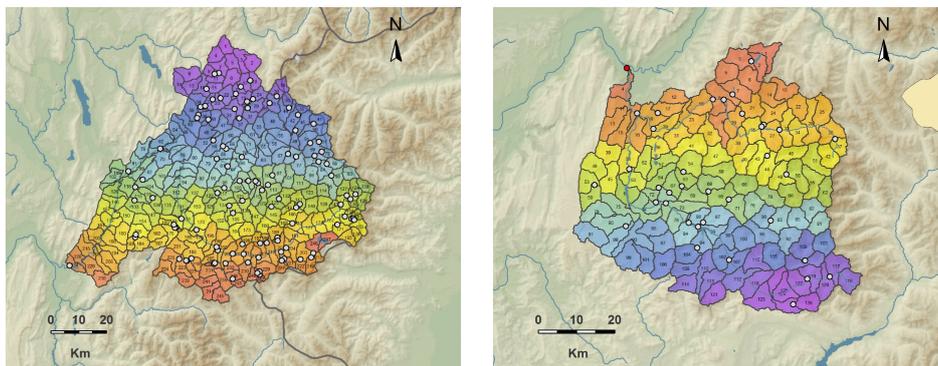


FIGURE 3 – Les entités hydrologiques de MORDOR-TS sur le bassin versant de l'Isère à Grenoble (gauche) et le Drac à Fontaine (droite). Les couleurs ne sont pas informatives (elles codent le numéro de l'entité, qui est arbitraire).

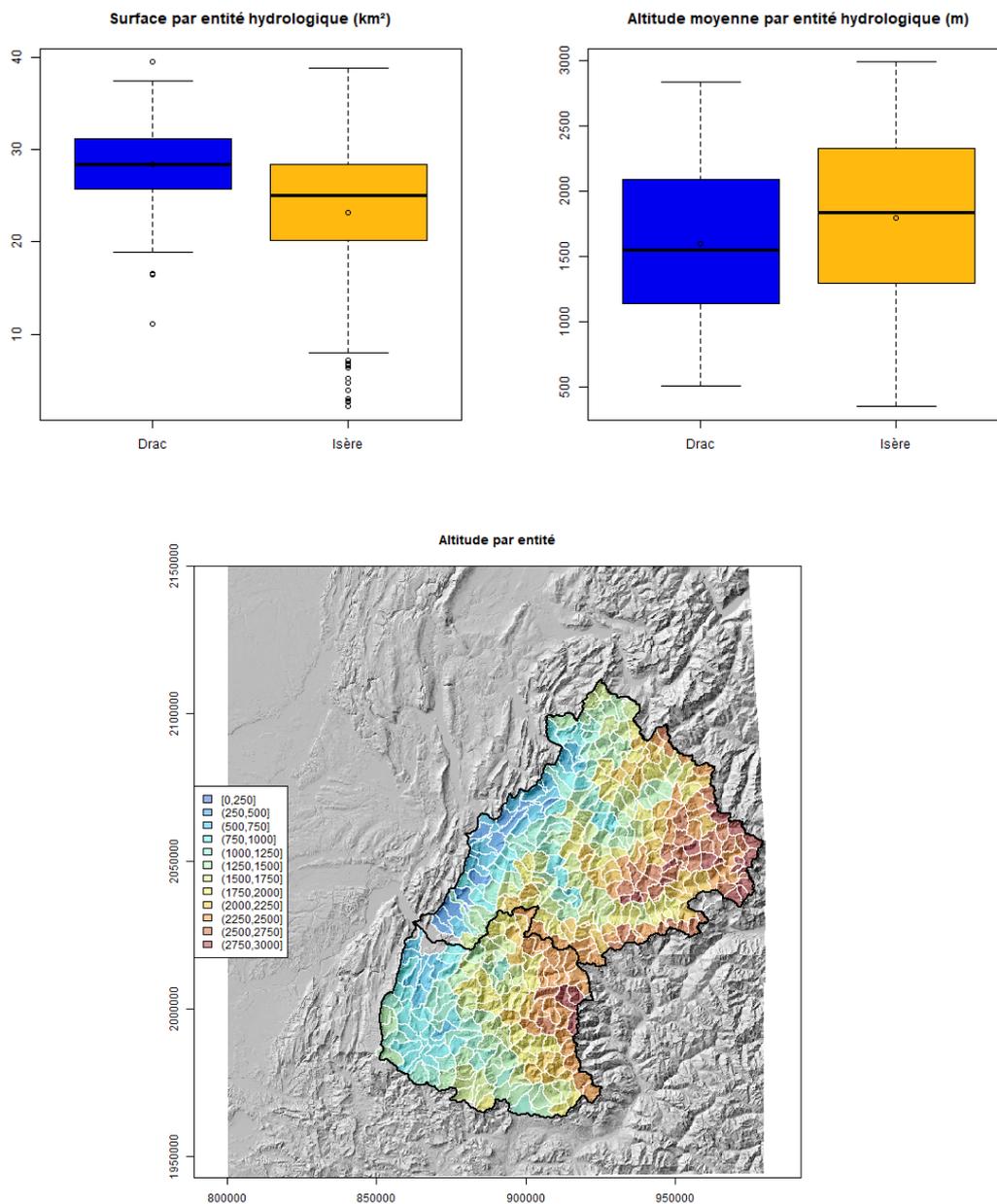


FIGURE 4 – Haut : Surface (gauche) et altitude moyenne (droite) des entités hydrologiques : Bas : Carte des bassins versants de l'Isère et du Drac en coloriant les entités hydrologiques en fonction de leur altitude moyenne.

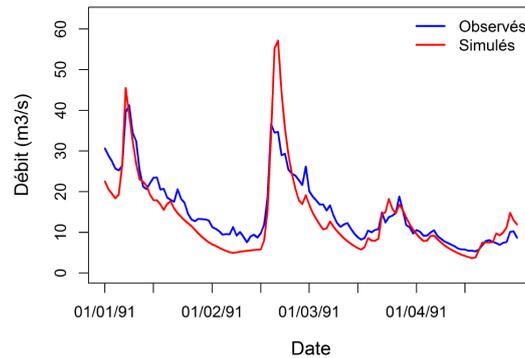


FIGURE 5 – KGE débit : chronique de débit observé et simulé.

2.3 Calage du modèle MORDOR-TS

MORDOR-TS a été calé par EDF-DTG avec en entrée les précipitations SPAZM. Le calage se fait par rapport à 4 fonctions objectives utilisées comme score tant à la calibration qu'à la validation spatiale. Ces fonctions objectives sont calculées à partir du critère KGE calculé sur les variable X_{sim} et X_{obs} de la façon suivante :

$$KGE = 1 - \sqrt{(R(X_{sim}, X_{obs}) - 1)^2 + \left(\frac{\sigma(X_{sim})}{\sigma(X_{obs})} - 1\right)^2 + \left(\frac{\bar{X}_{sim}}{\bar{X}_{obs}} - 1\right)^2} \quad (1)$$

où X_{sim} est la variable simulée, X_{obs} la variable observée, R est le coefficient de corrélation de Pearson, σ est l'écart-type et \bar{X} la moyenne.

Le critère KGE varie entre $-\infty$ et 1 et est optimal pour $KGE = 1$. Il s'agit d'une décomposition du critère Nash-Sutcliffe Efficiency [Nash and Sutcliffe, 1970] très largement utilisé en hydrologie. Le premier terme $(R(X_{sim}, X_{obs}) - 1)^2$ quantifie la corrélation entre les variables simulée et observée : il est d'autant plus proche de 0 que la corrélation est importante. Le second terme $\left(\frac{\sigma(X_{sim})}{\sigma(X_{obs})} - 1\right)^2$ quantifie le biais de variance : il est d'autant plus proche de 0 que les variables simulée et observée ont la même variance. Enfin, le troisième terme $\left(\frac{\bar{X}_{sim}}{\bar{X}_{obs}} - 1\right)^2$ quantifie le biais de volume : il est d'autant plus proche de 0 que les variables simulée et observée ont la même moyenne. Au final, le KGE est d'autant meilleur qu'il est proche de 1.

Les fonctions objectives de MORDOR-TS sont détaillées dans la thèse de Laura Rouhier [Rouhier, 2018], p. 46-49, de laquelle les figures et explications suivantes sont reprises :

- Le « KGE débit » est appliqué à l'ensemble des valeurs journalières de la chronique, cf Figure 5. Le critère KGE appliqué à l'ensemble des valeurs de débit journalier évalue la capacité du modèle à reproduire l'ensemble des processus hydrologiques.
- Le « KGE régime » est appliqué aux moyennes journalières interannuelles de la chronique de débit journalier, cf Figure 6. La signature hydrologique sur laquelle est calculée le critère est ainsi une chronique de 365 valeurs dont la première est la moyenne des débits de tous les 1ers janvier, etc. Le KGE appliqué au régime journalier interannuel reflète l'interaction entre l'eau et la disponibilité énergétique ainsi que le stockage dans les bassins versants.
- Le « KGE crues » évalue les distributions mensuelles de débits classés journaliers, cf Figure 7. Les débits observés et simulés n'étant plus appairés, la dynamique temporelle n'intervient pas et seule la distribution fréquentielle des débits est analysée. Pour bâtir ce critère, le KGE est dans un premier temps appliqué indépendamment aux distributions de débits classés de chaque mois

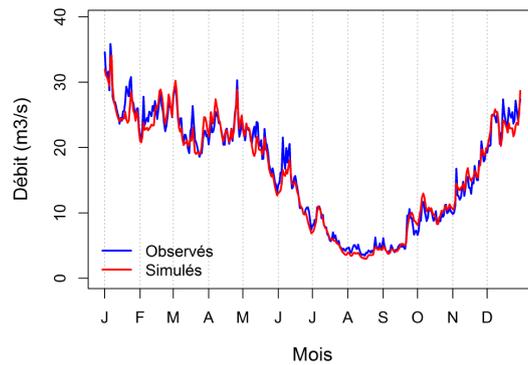


FIGURE 6 – KGE régime : régime journalier interannuel simulé et observé à un point de contrainte (station hydrométrique).

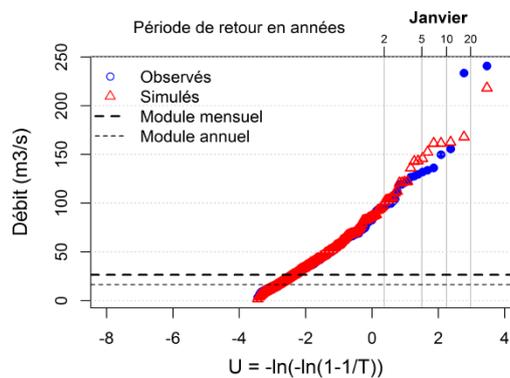


FIGURE 7 – KGE crues : période de retour simulée et observée pour un point de contraintes (station hydrométrique).

de l'année. Pour un mois donné, tous les débits journaliers de la chronique survenant durant ce mois-là sont classés. Le critère KGE compare alors les débits observés et simulés selon leur rang. Les 12 KGE sont ensuite agrégés à l'aide d'une moyenne pondérée par les modules mensuels pour donner une unique valeur : le « KGE crues ». Grâce à la pondération, un poids plus important est accordé aux mois ayant de forts débits. Ainsi, ce critère donne plus de poids aux crues, signature hydrologique associée aux processus très dynamiques.

- Le « KGE étiage » caractérise les récessions de flux. Le KGE est appliqué à une sélection de récessions de la chronique de débit journalier. La sélection des épisodes se fait sur la chronique observée selon la méthode illustrée sur la Figure 8. Elle résulte du lissage de la chronique sur une fenêtre de sept jours, de la sélection des périodes décroissantes sur la chronique lissée, de la suppression des sept premiers jours de chaque période, et de la suppression des séquences inférieures à cinq jours. L'étape de lissage vise à s'affranchir du bruit éventuel sur les débits observés, tandis que la suppression des sept premiers jours permet de se concentrer sur la vidange du réservoir profond. Une fois les récessions pré-sélectionnées, seules celles dont le mois présente un débit mensuel inférieur au débit mensuel médian sont retenues et soumis au critère KGE. Ainsi, ce critère s'intéresse aux faibles débits ou étiages, signature associée aux processus long-terme.

S'ensuit ensuite une démarche d'optimisation de ces quatre fonctions objectives KGE grâce à l'algorithme de calage multi-objectif de type génétique. Son objectif est d'approcher le front de Pareto optimum, c'est-à-dire l'ensemble des jeux de paramètres qui constituent les meilleurs compromis entre les différents objectifs parfois conflictuels. Il est donc intéressant de noter que MORDOR-TS n'est pas

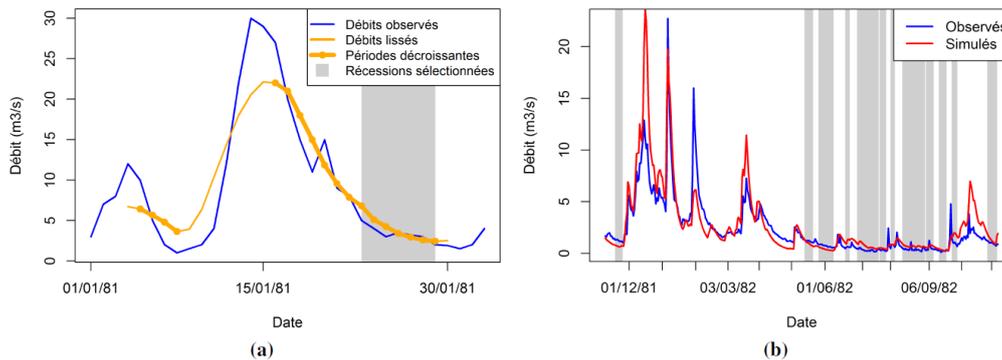


FIGURE 8 – KGE étiage : illustration de (a) la méthode de sélection des récessions et de (b) la signature hydrologique sur laquelle est calculée le critère KGE étiage. Pour (b) les plages indiquées en gris correspondent aux récessions sélectionnées, i.e. aux périodes sur lesquelles est calculé le critère.

calé spécialement sur sa capacité à reproduire les hauts débits, mais que ce n'est qu'un critère parmi quatre.

2.4 Utilisation du modèle MORDOR-TS avec COMEPHORE : normalisation des cumuls annuels

MORDOR-TS a été calé sur les précipitations SPAZM. Pour pouvoir utiliser ce calage avec d'autres entrées pluviométriques, il faut que les précipitations en entrée bouclent le bilan hydrologique. Or les cumuls annuels des réanalyses COMEPHORE diffèrent de SPAZM en magnitude et en répartition spatiale, comme le montre la Figure 9. On note un marquage très fort des reliefs sur le cumul annuel SPAZM. On note aussi que les plus forts cumuls annuels de SPAZM autour de 3000-3500 mm sont très localisés et ont tendance à aplatir la légende et rendre difficilement comparables les cartes des cumuls. C'est pourquoi sur la 2ème ligne de la Figure 9 montre les cumuls annuels censurés à 2000 mm. On note que les massifs préalpins et notamment la partie ouest de ces massifs (Bauges, Vercors et Chartreuse) ressortent bien de la carte des cumuls annuels sur SPAZM comme sur COMEPHORE. Il est notable de constater le faible cumul annuel COMEPHORE sur la Vanoise. Cette zone correspond à une zone très mal couverte par les radars jusqu'en 2016, date à laquelle le radar du Moucherotte est entré en fonction.

Pour boucler le bilan hydrologique sur lequel est calé MORDOR-TS, on normalise les précipitations COMEPHORE par le cumul annuel SPAZM/COMEPHORE entre 1997 et 2017, cette normalisation est calculée pour chaque pixel et chaque année. En effet, étant donnée l'évolution de la qualité radar COMEPHORE chaque année, il s'avère plus judicieux de corriger les précipitations COMEPHORE de l'année i par le ratio :

$$\text{Cumul}_{\text{SPAZM}_i} / \text{Cumul}_{\text{COMEPHORE}_i}$$

On trace en Figure 10 le facteur correctif (calculé par pixel) pour les années 2007 et 2017, ainsi que l'indice de qualité annuelle fournie dans COMEPHORE. Il consiste pour chaque pixel et chaque élévation à définir un poids de pondération $P = P_{ATT}P_{VIS}P_H$, dans lesquels P_{ATT} , P_{VIS} et P_H sont des poids dépendant respectivement de l'atténuation du faisceau (distance au radar), du taux de masque et de la hauteur du faisceau, cf Figure 11. Le code qualité est défini comme le maximum sur les différents radars des poids de pondération multiplié par 100.

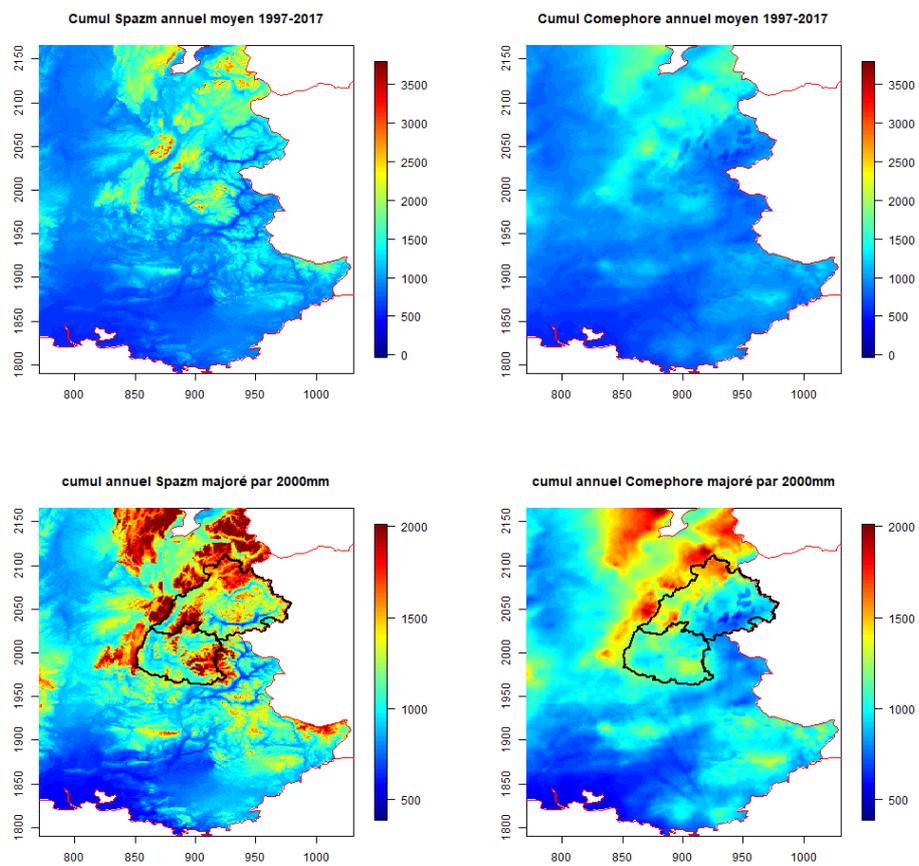


FIGURE 9 – Cumul annuel moyen en fonction de la réanalyse utilisée sur la période 1997-2017.

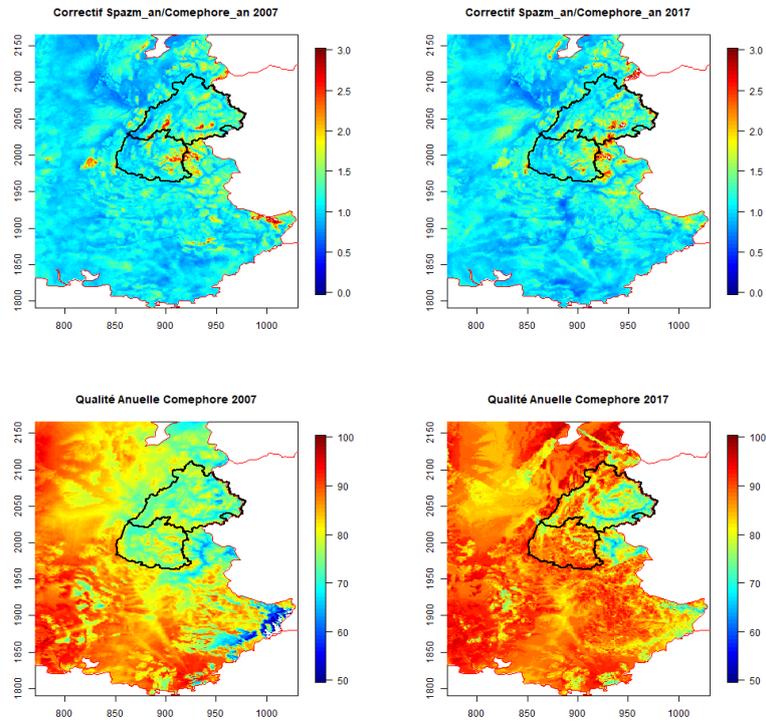


FIGURE 10 – Correctif par pixel (haut) et qualité moyenne des réanalyses COMEPHORE (bas) pour les années 2007 et 2017. Les frontières noires montrent les bassins versants de l’Isère et du Drac.

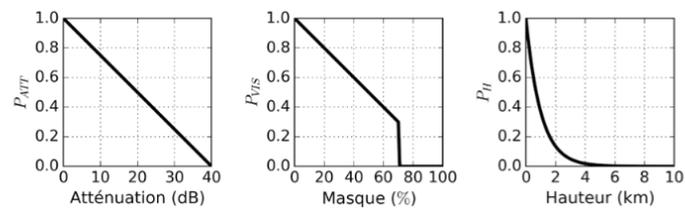


FIGURE 11 – Poids attribué pour chaque critère, respectivement correction d’atténuation, taux de masque et hauteur du faisceau.

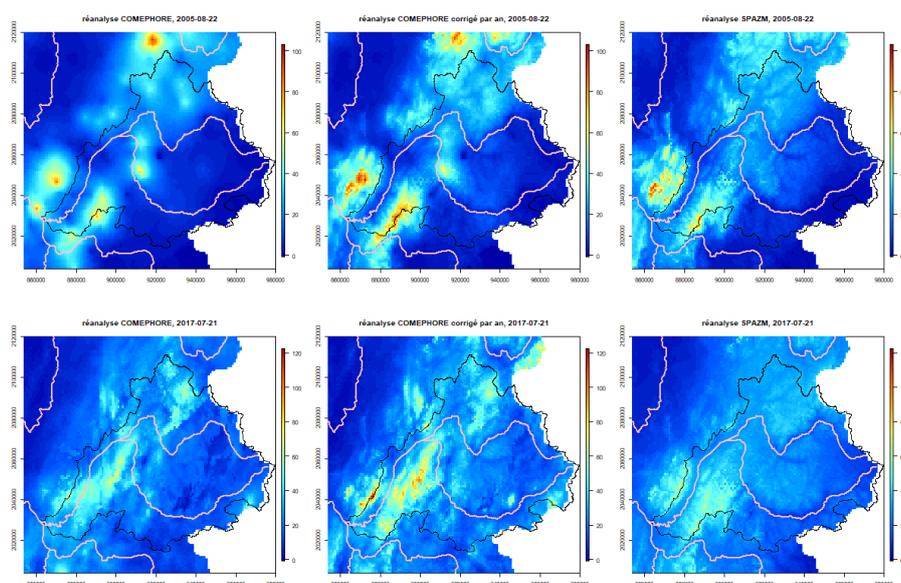


FIGURE 12 – Réanalyses COMEPHORE, COMEPHORE corrigé et SPAZM pour l'événement du 22 août 2005 (haut) et du 21 juillet 2017 (bas).

Le facteur correctif est important sur les zones de montagne et peut aller jusqu'à 3 sur certains massifs comme les Écrins ou la Vanoise. Ces forts correctifs correspondent aux zones de fort masque radar. On retrouve par exemple que l'est des hauts sommets de l'Isère sont masqués, les radars étant tous situés à l'ouest ou au nord du bassin. Ceci est particulièrement marqué en Vanoise à l'est de la dent Parrachée et de l'aiguille de Pécelet ainsi que dans la vallée du haut-bréda avant 2016. C'est d'autant plus gênant que la visibilité radar de part et d'autre de ces hauts sommets est généralement faible puisque sur les hauts reliefs, la bande brillante peut gêner la visibilité (voir les cartes de qualité en Figure 10).

Pour illustration, on montre en Figure 12 les champs de précipitation avec les différentes réanalyses COMEPHORE, COMEPHORE corrigé et SPAZM lors de deux événements de crues torrentielles : crue du Doménon le 22/08/2005 (avant le fonctionnement du radar du Moucherotte) et crue du Manival, du Merderel, du torrent Saint-Julien et du Nant des fruitiers le 21/07/2017.

Sur cet événement, la couverture radar permet de voir de fortes précipitations correspondant aux différentes crues de la journée. Le Nant des fruitiers par exemple visible au niveau de la pointe nord du massif de Belledonne a réagi fortement. Les réanalyses COMEPHORE ont vu cet événement pluvieux que SPAZM n'a pas détecté.

2.5 Comparaison des performances de MORDOR-TS avec SPAZM et COMEPHORE

L'évaluation des performances de MORDOR-TS avec les différents forçages s'est faite sur les débits. Pour chaque point de contrainte pertinent, le débit modélisé est comparé avec le débit observé. On exclut certains points de contraintes qui ne sont pas pertinents selon EDF-DTG (prise d'eau par exemple). Les points de contraintes exclus sont : Pour l'Isère : PE_DorinetBelleville. Pour le Drac : Ferrand@PE, Sesia@PE, Drac@Ricous. La période 2007-2017 est choisie pour servir de comparatif entre le forçage SPAZM et COMEPHORE sur la réanalyse radar de meilleure qualité.

La Figure 13 rassemble les scores KGE en débit aux différents points de contraintes (boxplots de droite), ainsi que les scores des 3 composantes du KGE (cf Eq. 1), quantifiant respectivement la corrélation entre les variables simulée et observée (KGE_r), le biais de variance (biais var) et le biais de moyenne (biais moy). Pour tous ces scores, l'optimum est 1. Il ressort clairement que le forçage COMEPHORE non corrigé en vert est un très mauvais forçage pour le modèle pluie-débit et ne permet pas de reconstituer un débit correct à l'exutoire. Il minimise fortement le cumul de précipitations et donc possède un biais moyen important. Aussi il minimise assez fortement les pointes de débit avec un biais de variance assez fort. Le KGE total est donc forcément très dégradé. Ce graphique permet de montrer l'apport fait par la correction sur le produit COMEPHORE dans les Alpes du nord.

D'autre part, la différence entre les scores KGE avec les deux forçages COMEPHORE corrigé et SPAZM sont limités. On constate que le biais de variance de COMEPHORE est inégal entre les différents points de contraintes. L'étendue interquartile du biais de variance est deux fois plus importante pour le forçage COMEPHORE corrigé que pour le forçage SPAZM. Une explication possible est le facteur correctif parfois très important (entre 2 et 3 sur certaines zones de montagne ou zone de masque, cf Figure 10). Si une précipitation faible est détectée elle est multipliée par le facteur correctif et peut entraîner un débit modélisé important. Si la précipitation n'est pas détectée le facteur correctif ne changera pas le résultat qui restera presque nul. Cela peut avoir comme effet d'amplifier le biais de variance pour certains points de contraintes où la visibilité radar est faible. Le KGE global en sera impacté d'autant. Par ailleurs, on peut noter que le bassin versant de l'Isère semble être mieux calibré que celui du Drac avec des KGE plus proches de 1.

2.6 Comparaison de l'ordre de grandeur des performances MORDOR-TS / MORDOR-SD avec SPAZM et COMEPHORE

Les résultats de la Figure 14 croisent les résultats de cette Action avec ceux de l'Action 4, pour les 7 bassins versants du Drac et de l'Isère ayant les mêmes frontières et le même exutoire que ceux du découpage de MORDOS-TS, à savoir :

- L'Arvan à Saint-Jean-d'Arves, station La Villette,
- Le Gelon à la Rochette,
- La Roizonne à la Valette,
- La Jonche à la Mure,
- La Bonne à Entraigues, station Pont Battant,
- La Severaisse à Villar-Loubière,
- La Gresse à Gresse en Vercors.

La comparaison a pour but de mieux appréhender les résultats respectifs et notamment la comparaison COMEPHORE versus SPAZM et MORDOR-TS versus MORDOR-SD. La comparaison est faite sur les KGE en débit, sur la période 1998-2017. Il est clair que la visibilité COMEPHORE sur ces bassins est faible sur la partie 1998-2006. Comme MORDOR-TS est au pas de temps journalier et MORDOR-SD au pas de temps horaire, il est décidé de comparer les KGE au pas de temps journalier. On procède donc à l'agrégation par jour des débits générés par MORDOR-SD avant de calculer le KGE débit modélisé-débit observé.

La Figure 14 montre que, sur les bassins versant comparés, MORDOR-SD avec le forçage SPAZM est du même ordre de grandeur qu'avec le forçage COMEPHORE bien que légèrement moins bon que ce dernier. Pour MORDOR-TS, les performances du modèle avec l'un ou l'autre des forçages se valent. On note que sur ces bassins versants excepté l'Arvan, MORDOR-SD arrive à donner une meilleure

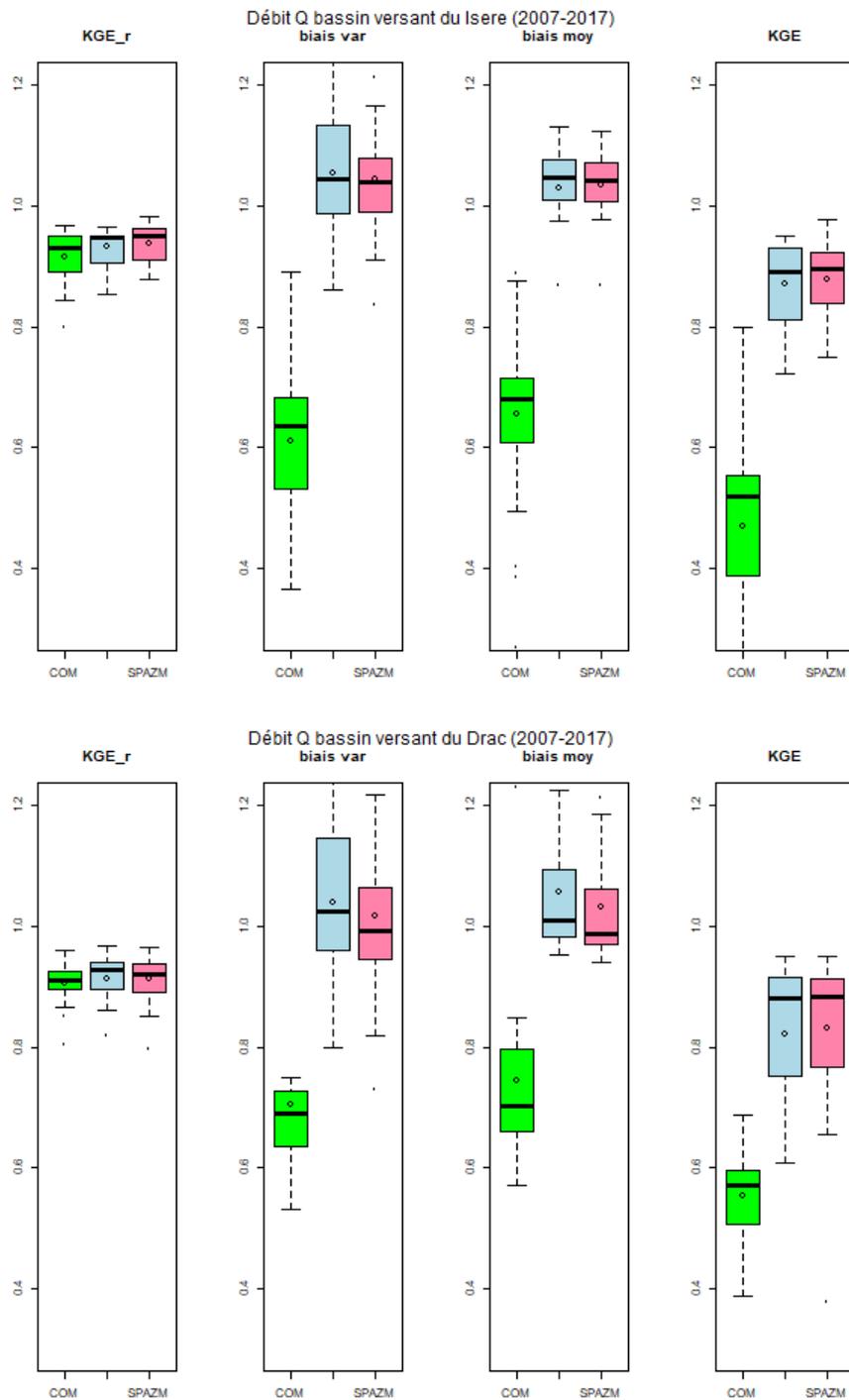


FIGURE 13 – Score KGE sur les débits pour les bassins versants de l'Isère (haut) et du Drac (bas), avec COMEPHORE (vert), COMEPHORE corrigé (bleu) et SPAZM (rose).

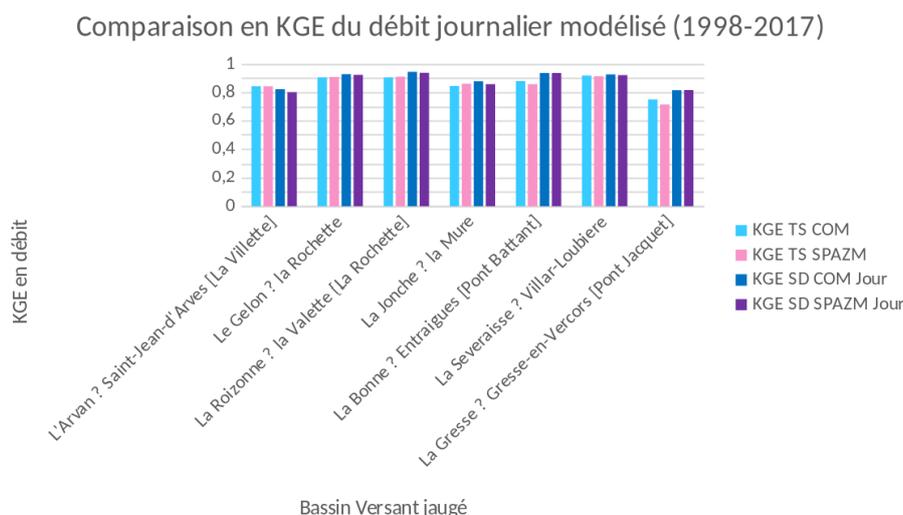


FIGURE 14 – Comparaison du score KGE en débit de MORDOR-TS et MORDOR-SD avec comme forçage COMEPHORE corrigé et SPAZM pour MORDOR-TS et COMEPHORE et SPAZM pour MORDOR-SD.

estimation du débit que MORDOR-TS. A savoir que la correction du forçage de pluie COMEPHORE dans MORDOR SD est assurée par le calage du coefficient C_p calé par entité et venant moduler (ici amplifier) la pluie sur la surface du bassin versant, ce qui diffère donc de la correction par pixel et année utilisée dans MORDOR-TS (sans calage hydrologique).

Il n'y a donc pas d'incohérence entre les résultats sur MORDOR-TS et MORDOR-SD sur l'impact du forçage COMEPHORE/SPAZM sur les résultats. Pourtant, les résultats de l'Action 4 montrent sur une majorité des BV étudiés des KGE bien meilleurs avec COMEPHORE qu'avec SPAZM. Deux constats peuvent justifier cela. Tout d'abord, les bassins versants de l'Action 4 sont principalement en dehors des Alpes du nord et des hauts reliefs. La couverture radar y est bien meilleure que dans les BV de l'Isère et du Drac qui sont parmi les moins visibles, ce qui joue en la défaveur de COMEPHORE. De plus, dans l'Action 4, les scores de MORDOR-SD avec SPAZM proviennent de la désagrégation journalière des précipitations SPAZM à l'aide de SAFRAN pour générer des précipitations horaires [méthode DuO, voir Magand, Claire et al., 2018]. Cette méthode ne permet pas de bien restituer la dynamique infra-journalière des précipitations et diminue les performances des débits simulés avec des données désagrégées à l'échelle horaire. La comparaison menée ici en débit journalier avec forçage COMEPHORE et SPAZM montre une bonne cohérence que ce soit en totalement spatialisé ou en semi-distribué.

3 Coordination des crues passées, à l'aide de SPAZM et COMEPHORE

3.1 Étude de la concomitance torrent-torrent

3.1.1 Sélection des événements forts

Étudier la concomitance torrent-torrent permet d'évaluer le risque de débordement de plusieurs torrents simultanément. Cela peut de plus donner des informations sur l'ampleur des situations météo-

rologiques génératrices d'événements torrentiels. Le modèle MORDOR-TS possède un découpage en entités hydrologiques ayant pour la grande majorité une surface de 20 à 30 km², et contenant un ou plusieurs torrents proches. La concomitance inter-torrents peut donc être, dans une certaine mesure, appréhendée par la concomitance inter-entités. Néanmoins, MORDOR-TS ne donnant pas les débits totaux mais les débits produits par chaque entité, la concomitance inter-torrents étudiée ici est la concomitance en débit produit par l'entité (qui regroupe souvent plusieurs torrents), sans routage des débits provenant des entités en amont.

Soulignons que le pas de temps journalier de MORDOR-TS est une limite à l'étude de la concomitance inter-torrents. Néanmoins l'hypothèse retenue ici est que ce pas de temps permet d'obtenir une partie non-négligeable du signal de crue car les crues torrentielles s'accompagnent généralement de forts cumuls de précipitation à l'échelle de la journée, et donc d'une signature sur les débits à l'échelle journalière.

La première étape est de sélectionner un seuil d'intérêt, c'est-à-dire une probabilité de non dépassement à partir de laquelle on peut considérer qu'un événement torrentiel fort est en cours dans cette entité. Si la probabilité seuil retenue est trop faible, on risque de regarder des journées avec des débits trop médians et qui ne sont donc pas impactants. Si la probabilité seuil retenue est trop grande, le nombre d'événements étudié devient trop faible pour faire des statistiques sur 20 ans de données. Aussi avec une probabilité seuil trop importante, il est probable de rater des événements d'une durée faible vu le pas de temps journalier retenu. Afin de maximiser le nombre d'événements forts, on utilise la période 1998-2017 et on décide qu'une probabilité de non-dépassement de 0.99 est un bon compromis. Il est à noter qu'on utilise ici le terme "événement fort" pour "journée à fort débit" mais il ne s'agit pas d'un événement hydrologique ou hydrométéorologique (qui durent souvent plusieurs jours).

3.1.2 Graphe de concomitance torrent-torrent

Si l'on choisit une entité hydrologique (i), on peut regarder la probabilité conditionnelle que le débit produit par chaque autre entité dépasse son quantile 99 sachant que le débit produit par l'entité (i) dépasse le sien. Cela donne des cartographies comme la Figure 15 pour deux entités de référence.

Afin de synthétiser les résultats pour toutes les entités, on représente toutes les probabilités conditionnelles sur un même graphe comme suit :

- Chaque entité hydrologique est représentée par le point situé à son centre de gravité géographique.
- Pour une entité (i) fixée :
 - On calcule les probabilités conditionnelles qu'une entité (j) quelconque dépasse son quantile 99 sachant que l'entité (i) dépasse le sien. On obtient une carte telle qu'en Figure 15 avec des points colorés pour représenter les entités.
 - On déplace tous les points colorés (centres de gravité des entités) de sorte que l'entité (i) soit placée au point $(0,0)$.
- On répète ce schéma en changeant l'entité (i).

Pour N entités, le graphe final contient $N(N - 1)$ points colorés en dehors du $(0,0)$ (qui par définition correspond à une probabilité de 1). Si l'on considère un même niveau de quantile pour les entités (i) et (j) (comme ici le quantile 99), le graphe final est symétrique par rapport à $(0,0)$ puisque que pour des mêmes niveaux de quantiles pour i et j , la probabilité conditionnelle de j fort sachant i fort

Carte de probabilité de non dépassement conditionnelle du BV127 à : Carte de probabilité de non dépassement conditionnelle du BV360 à :

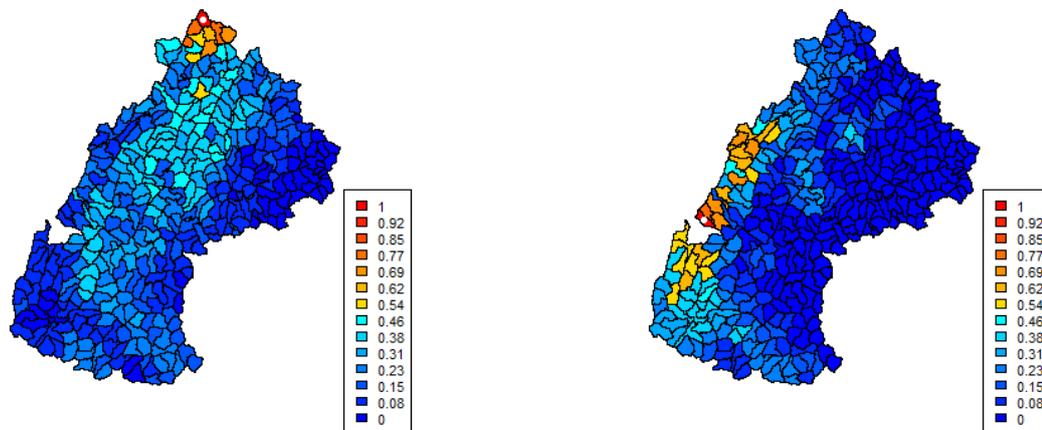


FIGURE 15 – Probabilité que le débit produit par une entité quelconque soit fort (excède son quantile 99) lorsque le débit produit par l'entité de référence (signalée par un point blanc) est fort (excède son quantile 99).

est égale à la probabilité conditionnelle de i fort sachant j fort. Enfin, pour synthétiser la forme et l'étendue des concomitances, on modélise les contours de probabilité conditionnelle par des ellipses dont la taille, l'orientation et l'anisotropie sont estimées par une méthode des moindres carrés à partir du graphe de concomitance. La Figure 16 montre le graphe de concomitance en débit produit avec SPAZM et COMEPHORE pour l'Isère et le Drac. L'ellipse correspond au contour de la zone de probabilité conditionnelle en débit produit $P(\text{entite}_1 > q_{99} | \text{entite}_0 > q_{99}) = 70\%$. La probabilité que les deux entités dépassent simultanément leur q_{99} de précipitation est donc de $0.01 \times 70\%$ (formule de Bayes). Cela arrive donc en moyenne 2.5 fois par an.

De manière générale, les graphes de concomitance des débits produits (Figure 16) sont très anisotropes pour l'Isère comme pour le Drac. Les probabilités conditionnelles décroissent très rapidement avec la distance.

Entre SPAZM et COMEPHORE, il y a peu de différences notables sur les débits produits sur ces graphiques. En particulier, ils semblent montrer la même anisotropie.

Entre l'Isère et le Drac, des différences intéressantes sont révélées par les graphes de concomitance torrent-torrent. Pour l'Isère il existe une forte anisotropie des concomitances de torrents deux à deux. Pour le Drac, il existe également une anisotropie des concomitances de torrents deux à deux. L'orientation est cependant différente de la figure sur l'Isère puisque l'orientation est nord-ouest sud-est.

3.1.3 Comparaison à la concomitance en précipitation

Pour comparaison aux résultats précédents sur les débits produits, on s'intéresse à la concomitance des précipitations journalières cumulées sur les entités. On considère comme avant le quantile 99 pour définir un événement fort de précipitation. Tout d'abord, il est important de noter que les dates des excès des q_{99} ne se recouvrent que peu pour ces deux variables. En effet, la Figure 17

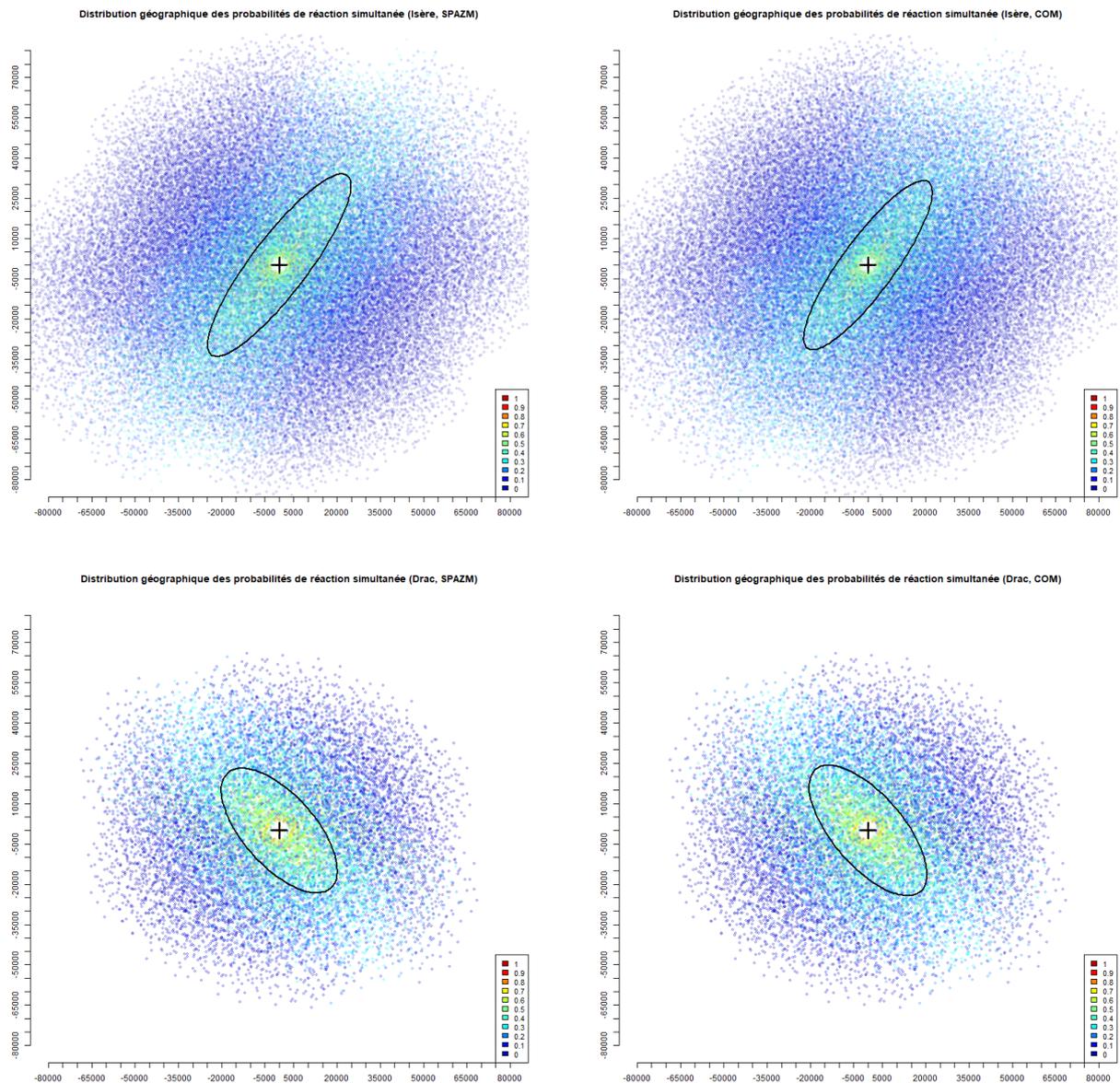


FIGURE 16 – Graphe de concomitance des forts débits produits avec SPAZM (gauche) et COMEPHORE (droite), pour l'Isère (haut) et le Drac (bas). Les ellipses correspondent au contour de la zone de probabilité conditionnelle en débit produit $P(entite_1 > q_{99} | entite_0 > q_{99}) = 70\%$.

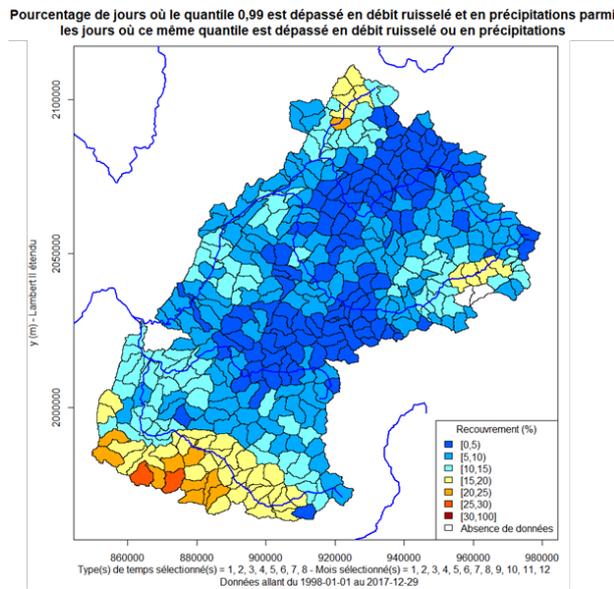


FIGURE 17 – Pourcentage de jours où le quantile 99 est dépassé en débit produit et en précipitation parmi les jours où ce même quantile est dépassé en débit produit ou en précipitation.

montre le pourcentage de jours où le quantile 99 est dépassé en débit produit et en précipitation parmi les jours où ce même quantile est dépassé en débit produit ou en précipitation, c'est-à-dire $P(\text{debit} > q_{99} \cap \text{precipitation} > q_{99} | \text{debit} > q_{99} \cup \text{precipitation} > q_{99})$. En cas de recouvrement parfait (c'est-à-dire tous les excès en précipitation sont des excès en débit), ce taux de recouvrement vaut 1. En cas de recouvrement nul (aucune date d'excès en commun), il vaut 0. La figure montre que le taux de recouvrement sur toute la région est assez faible. Parmi les jours d'excès, il y a moins d'un jour sur trois qui sont des excès à la fois en débit produit et en précipitation. Il est donc important de garder en tête que la comparaison entre précipitations fortes et débits produits forts que nous faisons ci-après ne porte globalement pas sur les mêmes jours.

On suit la même démarche qu'en Section 3.1.2 pour obtenir les graphes de concomitance des précipitations fortes, donnés en Figure 18. De manière générale, on constate que les probabilités conditionnelles décroissent rapidement avec la distance. Pour SPAZM, dès 10 km de distance, la probabilité conditionnelle de concomitance s'approche de 0.8, et dès 5 km pour COMEPHORE. Cette décroissance est néanmoins bien moins rapide que pour les débits produits (Figure 16). Il est notable qu'avec la même échelle de couleur, on n'obtient presque aucune probabilité conditionnelle en débit produit supérieure à 0.7. Cela montre une concomitance bien plus faible des forts quantiles de débit ruisselé deux à deux par rapport aux fortes précipitations.

Entre SPAZM et COMEPHORE, on remarque sur les figures COMEPHORE que la probabilité de non dépassement importante (orange rouge) s'estompe plus rapidement avec la distance que sur les figures SPAZM. Cette constatation suggère que les réanalyse COMEPHORE voient des précipitations intenses sur une zone plus étroites tandis que SPAZM les modélise de façon plus diffuse. On note que cette différence notable entre SPAZM et COMEPHORE en termes d'extension de la concomitance en précipitation ne l'est pas en débit produit (Figure 16). On peut émettre l'hypothèse que les différences entre forçages entre SPAZM et COMEPHORE ne se retrouvent pas dans le débit produit car le signal est très modifié par les autres caractéristiques propres à chaque bassin. En effet, les précipitations ne génèrent pas directement les débits produits puisqu'une partie de l'eau s'infiltre dans les nappes et une partie s'évapore. Ainsi les caractéristiques propres à chaque entité modifient le lien entre pluie

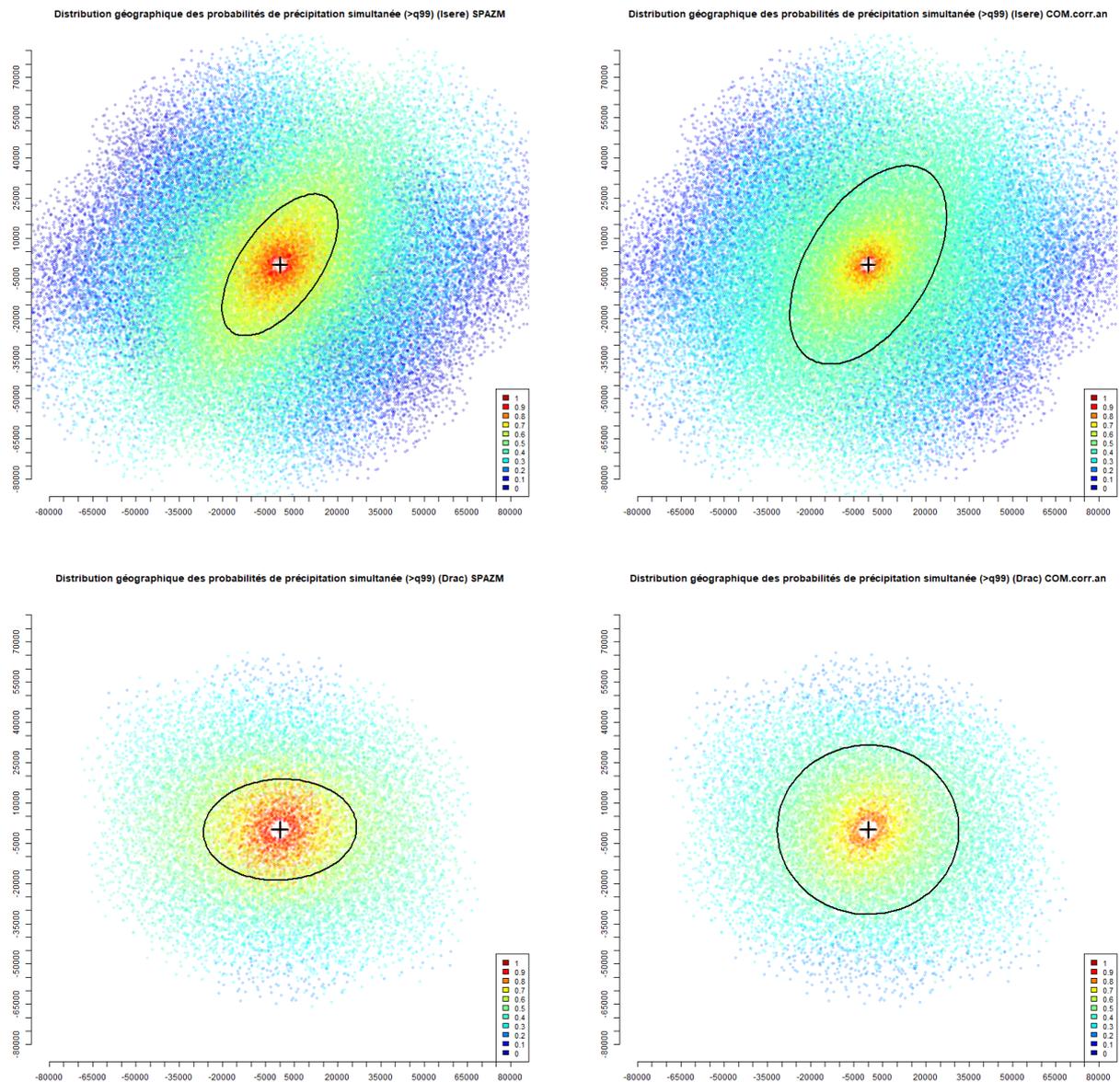


FIGURE 18 – Graphe de concomitance des forts cumuls de précipitations avec SPAZM (gauche) et COMEPHORE (droite), pour l'Isère (haut) et le Drac (bas). Les ellipses correspondent au contour de la zone de probabilité conditionnelle en cumul de précipitation $P(entite_1 > q99 | entite_0 > q99) = 70\%$.

précipitée et débit produit.

Entre l'Isère et le Drac, la différence notable est la présence d'une anisotropie nord-est/sud-ouest sur l'Isère que l'on ne retrouve pas sur le Drac. Cette anisotropie nord-est/sud-ouest se retrouve de manière moins nette que pour les débits produits (Figure 16). Pour le Drac, aucune anisotropie significative n'est notée, contrairement aux débits produits.

NB : à partir d'ici, étant donné les grandes similitudes des résultats avec SPAZM et COMEPHORE, par soucis de concision nous ne montrons dans la suite que les résultats avec SPAZM.

3.1.4 Étude de la concomitance à l'échelle locale

Les concomitances de fort débit produit et de fortes précipitations ont jusque là été étudiées de manière globale, c'est-à-dire aux échelles des bassins de l'Isère et du Drac. Afin d'étudier la non-stationnarité spatiale des concomitances, et en particulier l'effet du relief, nous répétons l'exercice de la Section 3.1.2 mais en l'appliquant localement, c'est-à-dire dans le voisinage de chaque entité. La taille de ce voisinage doit être choisie de manière à ce qu'il contienne assez d'entités pour estimer des concomitances, mais qu'il ne soit pas trop large pour regarder des effets assez locaux. Un bon compromis est de considérer un voisinage circulaire de rayon 20 km. Les entités ont alors entre 10 et 65 entités autour d'elles.

Pour une probabilité donnée p , une ellipse de concomitance représentant $P(entite_1 > q99 | entite_0 > q99) = p$ est donc obtenue dans le voisinage de chaque entité $entite_0$. La Figure 19 montre ces ellipses centrées sur chaque entité, lorsque $p = 0.95$ (le choix de p est arbitraire ; 0.95 est choisi pour faciliter la lecture de la carte). Dans les grandes vallées, les zones de concomitance en débit produit sont souvent parallèles au relief : c'est flagrant au niveau de la Chartreuse et des Bauges ; c'est également le cas dans le Dévoluy et dans la Haute-Maurienne. Les fortes concomitances se font surtout sur les premiers grands massifs susceptibles de bloquer les flux : dans les Bauges, dans la Chartreuse et dans le Vercors pour les flux d'Ouest, dans le Dévoluy pour les flux d'Ouest et de Sud, dans la Haute-Maurienne et à l'Est de la Haute-Tarentaise pour les flux d'Est. En amont de ces massifs, il y a soit des plaines soit des massifs beaucoup moins hauts. Dans les massifs intérieurs, on observe des concomitances bien plus faibles. On observe également que les ellipses ont pour la plupart la même orientation que la Figure 16 : des orientations Nord-Est/Sud-Ouest pour le bassin versant de l'Isère, et des orientations Nord-Ouest/Sud-Est pour le bassin versant du Drac. Néanmoins on remarque sur ces deux bassins de fortes disparités dans la taille des ellipses - d'où l'intérêt de l'étude locale par rapport à l'étude à l'échelle des bassins versants. Pour les fortes précipitations, les zones de concomitance sont beaucoup plus isotropes que pour les forts débits produits, ainsi que beaucoup plus étendues. On observe enfin une homogénéité spatiale bien plus grande - le relief semble ici avoir peu d'effet.

3.1.5 Pourquoi les concomitances en débit produit et en précipitation diffèrent-elles ?

Les sections précédentes ont montré d'importantes différences en terme de concomitance pour les précipitations et les débits produits. Une hypothèse simple pour expliquer ces différences pourrait être l'importance de la fonte glaciaire et nivale sur les forts débits. Pour confirmer ou infirmer cette hypothèse, on estime la part de fonte par rapport à la lame de précipitation par la moyenne du rapport suivant :

$$\frac{Lft + Lg}{PS - ETR'}$$

où Lft est la lame de fonte glaciaire, Lg est la lame de fonte glaciaire, PS est la précipitation, ETR est l'évapotranspiration réelle (échange d'eau et d'énergie entre le sol, la surface terrestre et l'atmosphère).

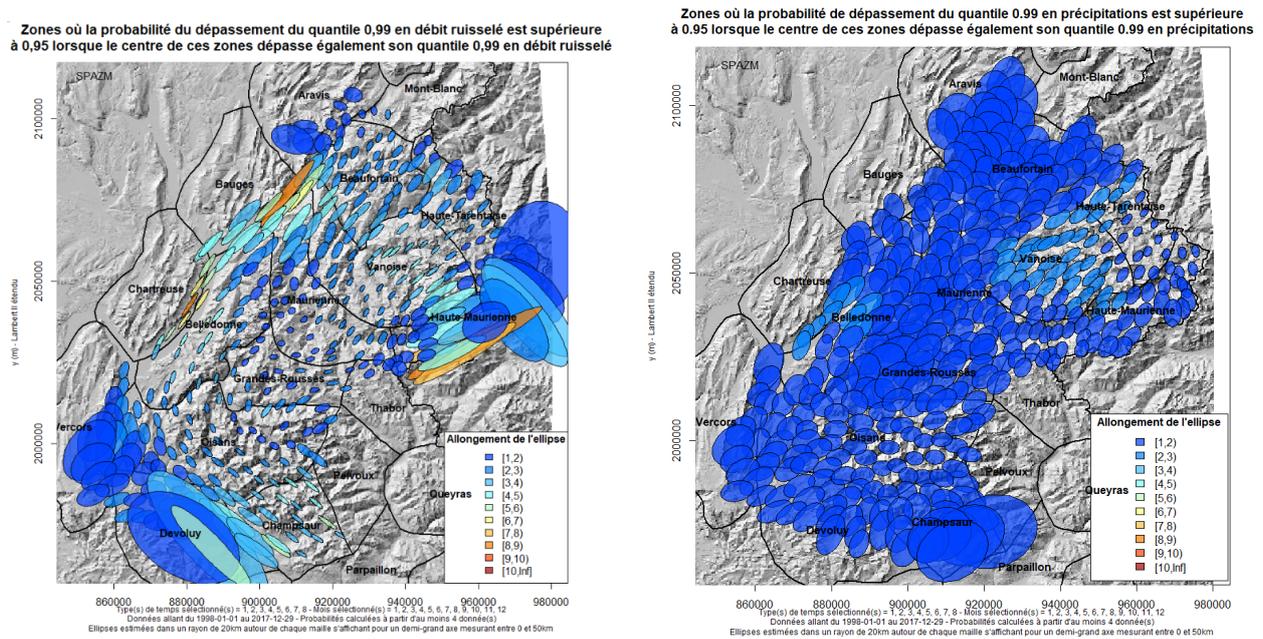


FIGURE 19 – Ellipses locales de concomitance des forts débits produits (gauche) et des forts cumuls de précipitation (droite) avec SPAZM. Les ellipses correspondent au contour de la zone de probabilité conditionnelle $P(entite_1 > q_{99} | entite_0 > q_{99}) = 0.95\%$, dans un voisinage circulaire de rayon 20 km autour de chaque entité. La couleur des ellipses représente leur allongement, à savoir leur ratio entre leur grand axe et leur petit axe. Plus la zone de concomitance est anisotrope (resp. isotrope), plus l'ellipse tourne vers le rouge (resp. bleu) foncé.

Le ratio de fonte estimé ci-dessus est acceptable en première approximation. Il peut être légèrement surestimant car la reprise évaporative sur la lame d'eau de fonte est négligée. En effet la lame d'eau de fonte entre normalement dans le réservoir de stockage d'eau du sol sur lequel s'applique l'évapotranspiration (communication personnelle avec Matthieu Le Lay EDF-DTG). La Figure 20 montre, pour chaque entité, la part de fonte lors des jours de fort quantile de débit produit. On remarque d'abord que la part de fonte est fortement liée à la topographie (cf Figure 4). On situe sur ces figures assez facilement les grandes plaines et vallées, telles que la Matheysine et le Triève pour le Drac ainsi que le Grésivaudan, la vallée de l'Arc et la vallée de la Tarentaise. Sur les hauts massifs comme les Écrins ou la Vanoise, la part de fonte peut représenter jusqu'à 40% de la lame de précipitation lors des jours de forts débits. Ce ratio baisse très nettement dans les contreforts et les vallées (bleu foncé à cyan) où ce ratio n'excède pas 15%. Globalement, on constate que le ratio de fonte, bien que potentiellement surestimant, reste assez négligeable ($< 20\%$) sur une partie importante des bassins versants. De plus, les massifs sur lesquels l'anisotropie en débit produit est la plus importante (Chartreuse, Bauges, Dévoluy, Haute-Maurienne, cf Figure 19) correspondent à des ratios de fonte parmi les plus faibles. On en conclut que la fonte n'est pas responsable de l'anisotropie en débit produit. A cette étape, il est donc difficile de conclure pourquoi les anisotropies de concomitance en précipitation et débit produit diffèrent. D'autres études seraient nécessaires pour cela, que nous laissons pour des recherches futures.

3.2 Étude de la concomitance rivière-torrent

3.2.1 Probabilité de concomitance

La concomitance rivière-torrent consiste à regarder la coordination spatiale et temporelle entre les forts débits torrentiels (débits produits sur les entités hydrologiques) et les forts débits dans les

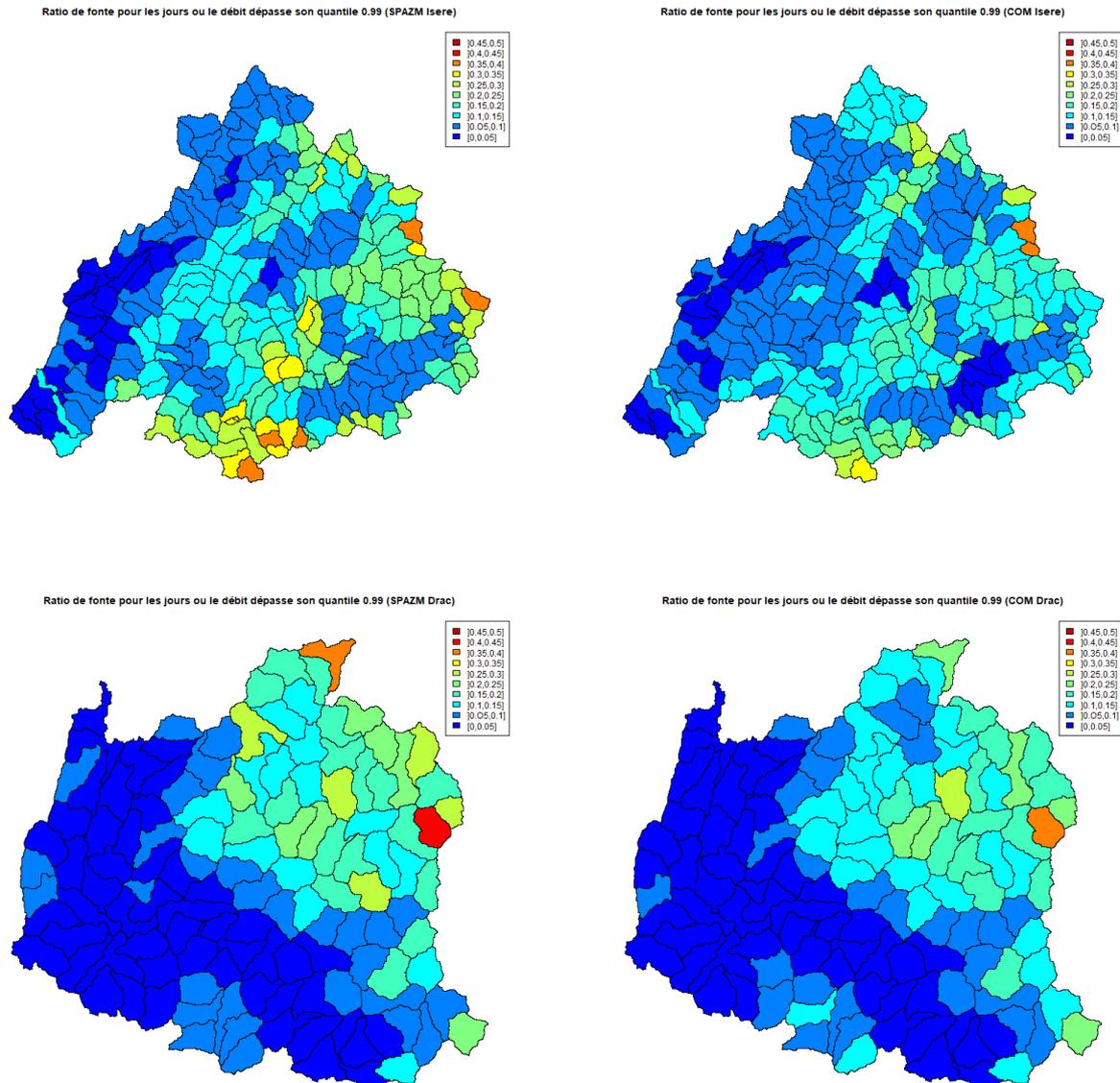


FIGURE 20 – Part de fonte par rapport à la lame de précipitation les jours où le débit produit excède son quantile 99. Gauche : pour les précipitations SPAZM. Droite : pour COMEPHORE.

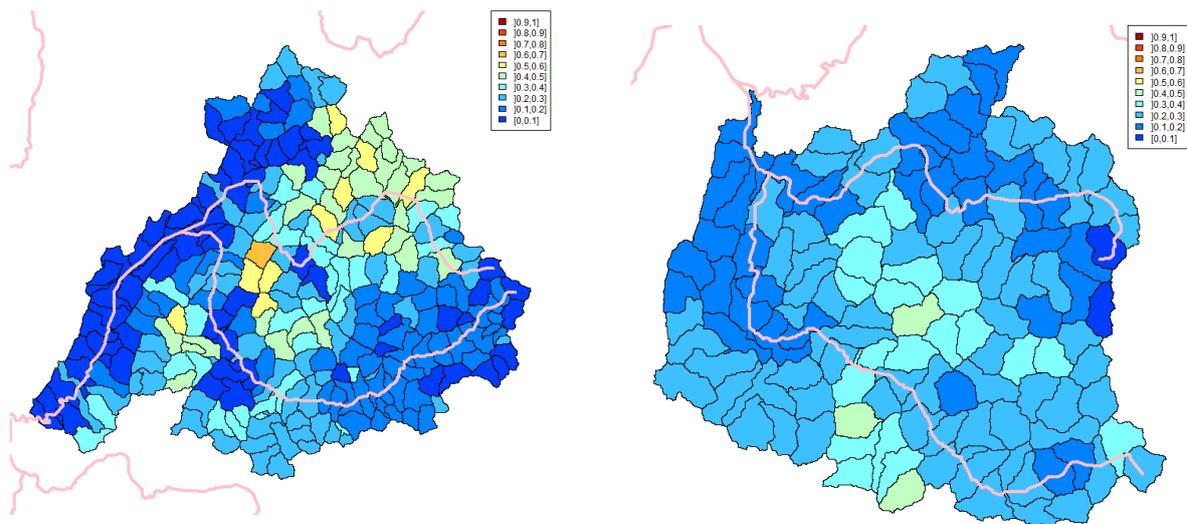


FIGURE 21 – Probabilité conditionnelle qu’une entité dépasse son quantile 99 en débit produit lorsque que la rivière à son exutoire dépasse son quantile 99 en débit sur l’Isère (gauche) et le Drac (droite).

rivières que sont l’Isère et le Drac. Dans cette approche nous utilisons les QNR (débits naturels reconstitués) de l’Isère à Grenoble et du Drac à Fontaine. On calcule la probabilité conditionnelle qu’un torrent dépasse son quantile 99 lorsque la rivière (Isère ou Drac) dépasse son quantile 99. A partir de cette probabilité, on remonte facilement à la probabilité jointe que la rivière et le torrent dépasse en même temps un certain quantile de débit ruisselé grâce à la formule de Bayes : $P(\text{riviere} > q_{99} \cap \text{entite}_i > q_{99}) = 0.01 \times P(\text{riviere} > q_{99} | \text{entite}_i > q_{99})$. Par la suite, pour trouver la probabilité jointe il suffira donc de multiplier la probabilité conditionnelle par 0.01. La Figure 21 montre ces probabilités conditionnelles pour l’Isère et le Drac, permettant de repérer les zones où les torrents réagissent fréquemment de manière concomitante aux rivières en hautes-eaux. Pour l’Isère, la variabilité géographique est importante et les torrents des massifs de Belledonne, de la Lauzière (Vanoise ouest) et de la Haute-Tarentaise - qui sont parmi les plus hauts massifs (cf Figure 4)- sont les plus coordonnés à l’Isère à Grenoble le même jour (40 à 60% de jours coordonnés). Au contraire, il n’y a quasiment aucune coordination avec les torrents des vallées du Grésivaudan et de la plaine de l’Arc. On en conclut que pour que l’Isère à Grenoble soit en hautes-eaux, il faut un système précipitant large échelle, c’est-à-dire touchant quasiment tout le bassin versant (de Belledonne à la Haute Tarentaise) et dans ce cas, ce sont surtout les massifs de haute altitude qui sont touchés (il n’est pas à exclure que ce dernier point soit en partie biaisé par la méthode SPAZM qui considère un fort gradient altitudinal). Pour le Drac, on remarque une plus grande homogénéité des probabilités conditionnelles. La plupart des entités ont au moins 20% de jours coordonnés avec le Drac en hautes-eaux. Le Dévoluy et le sud de l’Oisans (Valjouffrey) semblent être les plus coordonnés au Drac à Fontaine en hautes-eaux (30-40% de jours coordonnés). Si l’on zoome sur la ville de Grenoble on remarque que :

- 30-40% des jours où l’Isère à Grenoble est en hautes-eaux, les torrents de Belledonne le sont aussi,
- 0-10% des jours où l’Isère à Grenoble est en hautes-eaux, les torrents des contreforts sud de la Chartreuse le sont aussi,
- 10-20% des jours où le Drac à Fontaine est en hautes-eaux, les torrents des contreforts est du Vercors le sont aussi.

Dans les interprétations ci-dessus, on a considéré comme ”être en hautes-eaux” le fait de dépasser le quantile 99, ce qui arrive en moyenne 1 fois tous les 100 jours donc 3-4 fois par an. La Figure 22

montre ces mêmes cartes lorsque le seuil de quantile est changé. Le dépassement du quantile 0.95 peut s'interpréter un cas d'"assez hautes-eaux" (cela arrive 15-20 fois par an) et le dépassement du quantile 0.995 comme un cas de "très hautes-eaux" (cela arrive 1-2 fois par an).

De manière générale, l'augmentation du quantile diminue la probabilité de coordination, ce qui semble intuitif mais la diminution est significative. Plus les crues sont importantes (plus le quantile augmente), moins les dates de crue des torrents et des rivières sont coordonnées. Pour les assez hautes-eaux, jusqu'à 70% des dates des torrents et de l'Isère sont coordonnées en Haute-Tarentaise. Pour les très hautes-eaux, ce chiffre tombe à 40-50%, ce qui reste quand même très important. On en conclut que pour que l'Isère à Grenoble soit en très hautes-eaux, il faut un système précipitant large échelle. La variation spatiale reste d'ailleurs peu significative lorsque le seuil change (le Beaufortin et la Tarentaise semblent proportionnellement un peu se renforcer avec l'augmentation des quantiles). Si l'on zoome sur les environs de Grenoble on remarque que, à part en Belledonne, le changement de quantile a peu d'effet sur la concomitance :

- 50-60% des jours où l'Isère à Grenoble est en assez hautes-eaux, les torrents de Belledonne le sont aussi. 10-20% des jours où l'Isère à Grenoble est en très hautes-eaux, les torrents de Belledonne le sont aussi.
- 0-10% des jours où l'Isère à Grenoble est en assez à très hautes-eaux, les torrents des contreforts sud de la Chartreuse le sont aussi,
- 10-20% des jours où le Drac à Fontaine est en assez à très hautes-eaux, les torrents des contreforts est du Vercors le sont aussi.

3.2.2 Potentialité de concomitance

L'approche par probabilité conditionnelle ci-dessus permet d'estimer des probabilités de concomitance "non croisées" (par exemple la rivière et les torrents sont en hautes-eaux en même temps) mais elle ne peut informer sur la propension d'un torrent à être plus ou moins haut lorsque la rivière est en hautes-eaux. En effet si le débit produit du torrent est tout juste inférieur au quantile fixé, cet événement ne sera pas du tout pris en compte dans la figure précédente. Cet effet de seuil donne beaucoup d'importance au choix du seuil de probabilité de non dépassement. De plus cette approche nécessite d'avoir "foi" en la capacité de MORDOR-TS à reproduire l'occurrence des plus gros pics de crues torrentielles. Or MORDOR-TS, comme tout modèle hydrologique, tend à sous-estimer les pics de crue, comme le montre la Figure 23 représentant une année de débit simulé à l'exutoire d'un bassin composé de trois entités. Si le débit simulé est souvent assez proche de celui observé, on remarque pour la crue de mars que la simulation sous-estime de plus de 40% le pic de crue. Ce pic ne sera donc pas du tout considéré dans l'approche par probabilité conditionnelle de la section précédente.

Au vu de la difficulté pour le modèle de simuler correctement des quantiles locaux très importants et de les différencier de ceux importants, un autre indicateur est développé, permettant d'étudier la potentialité d'un torrent à être plus ou moins haut lorsque le débit de la rivière est haut. Cette approche permet d'étudier la coordination entre la rivière et l'entité torrentielle sans rater d'événements du fait d'un seuil placé trop haut. Pour cela, on fixe le quantile rivière et on calcule, pour chaque entité, la moyenne de la probabilité de non-dépassement en débit produit les jours où le débit rivière dépasse son quantile seuil. Si cette moyenne proche de 1, c'est que le torrent a une forte propension à avoir de forts débits coordonnés avec les forts débits de la rivière. Une moyenne de 0.9 par exemple signifie qu'en moyenne, lorsque la rivière est en crue, l'entité torrentielle considérée a un débit parmi ses 10% les plus forts. Une moyenne de 0.5 correspond à des concomitances aléatoires.

La Figure 24 montre la potentialité de concomitance pour un seuil rivière fixé au quantile 99. On remarque que les probabilités moyenne de non-dépassement sont toutes supérieures à 0.5, ce qui signifie

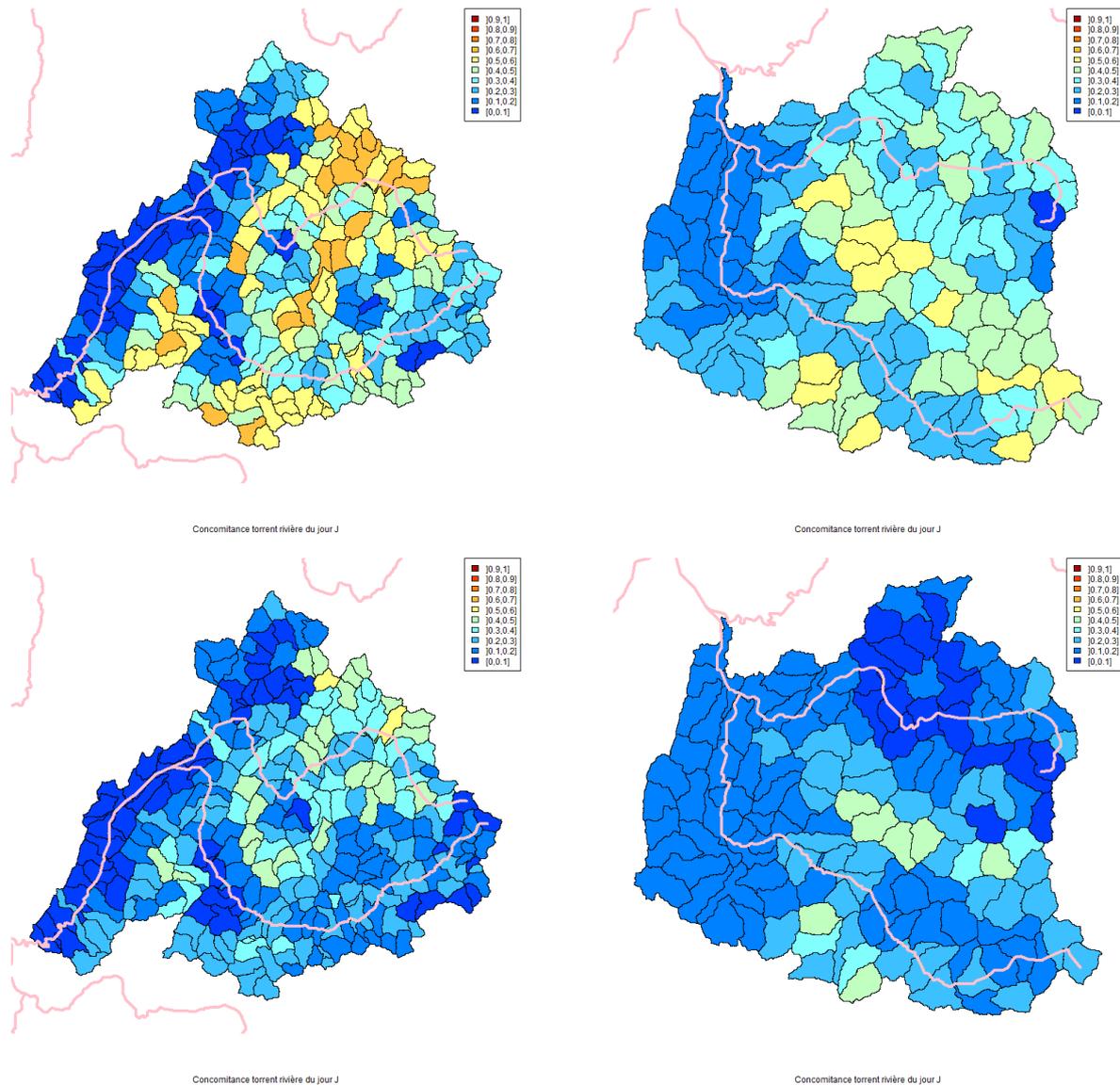


FIGURE 22 – Probabilité conditionnelle qu'une entité dépasse son quantile 95 (haut) ou 995 (bas) en débit produit lorsque que la rivière à son exutoire dépasse son quantile 95 (haut) ou 995 (bas) en débit sur l'Isère (gauche) et le Drac (droite).

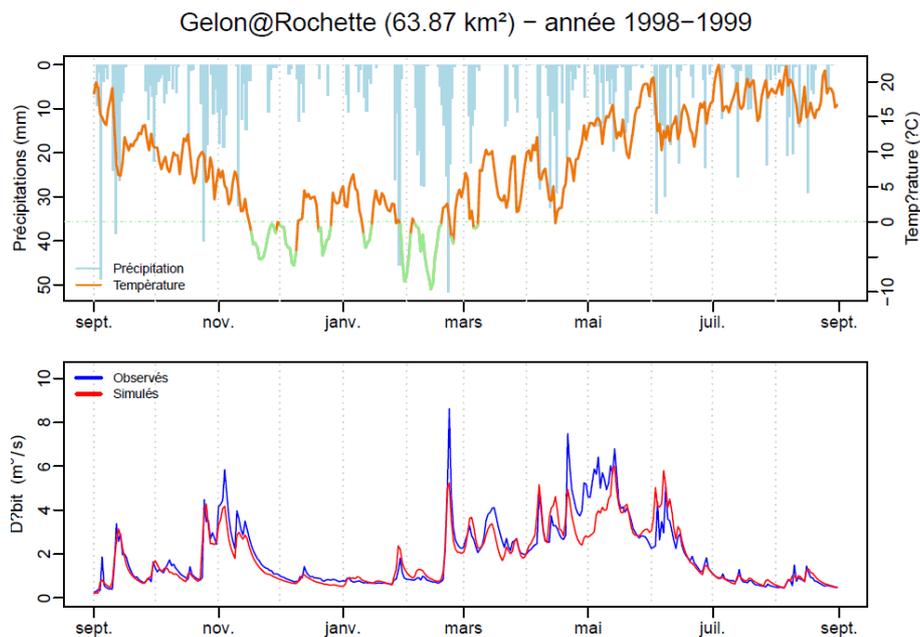


FIGURE 23 – Exemple de simulation de MORDOR-TS sur un petit bassin-versant torrentiel jaugé regroupant deux entités. Le pic de crue de mars est sous-estimé de 40%.

qu'il y a une tendance à la concomitance partout sur la région. La Figure 24 montre une répartition spatiale très comparable à la Figure 21. Une différence notable est néanmoins sur les contreforts des Bauges à l'ouest du bassin jusqu'à Ugine où les entités semblent assez peu réagir lorsque la rivière est en hautes-eaux (probabilité moyenne de non-dépassement de 60-70%), notamment comparativement à la Chartreuse (probabilité moyenne de non-dépassement de 80-85%). On en conclut que les torrents de Chartreuse tendent à être souvent assez hauts lorsque l'Isère est haute (Figure 24), bien qu'ils soient rarement hauts (Figure 21). Les torrents des Bauges tendent quant à eux à être souvent moyennement hauts (Figure 24) et rarement hauts (Figure 21). De même les torrents du Vercors tendent à être souvent assez hauts lorsque le Drac est haut, bien qu'ils soient rarement hauts.

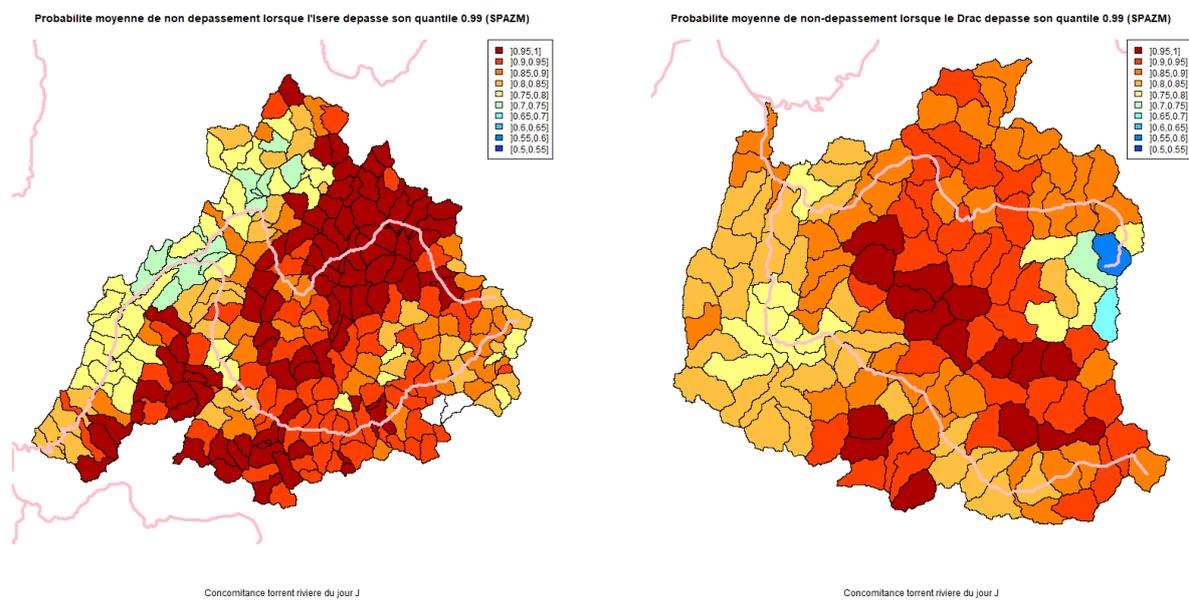


FIGURE 24 – Probabilité de non-dépassement en débit des torrents moyennée les jours où la rivière dépasse son quantile 99, pour l'Isère (gauche) et le Drac (droite).

4 Utilisation du générateur stochastique de pluie RAINSIM

4.1 Limites de l'analyse des concomitances à partir de réanalyses

L'étude sur les concomitances réalisée en Section 3 donne des informations précieuses sur la coordination des crues torrentielles. Le forçage pluviométrique a été fixé sur la période 1997 à 2017 qui est la période pour laquelle se recoupent les réanalyses COMEPHORE et SPAZM. L'analyse en débit a été réalisée sur la période 1998-2017 puisque le modèle hydrologique nécessite un an de mise à niveau de ses réservoirs de stockage. La profondeur temporelle est donc assez limitée et on peut difficilement regarder la concomitance au-delà du quantile 99 (3-4 excès par an) pour en faire des statistiques.

Ainsi, nous proposons de recourir :

- à un simulateur stochastique de champs de pluie journalière à même de reproduire les statistiques locales et spatiales des forçages pluviométriques
- à un simulateur de température basé sur les analogues, permettant de rééchantillonner des températures possibles vis à vis des précipitations simulées.

Il est alors possible d'utiliser ces forçages en entrée du modèle hydrologique MORDOR-TS afin d'aller étudier la réponse hydrologique et les concomitances de crue pour des temps de retour bien plus importants (en fonction de la longueur des séries simulées).

4.2 Le simulateur de pluie RAINSIM

Le simulateur stochastique RAINSIM [Vaithinada Ayar et al., 2020] est un générateur de champs spatiaux de précipitations à l'échelle journalière et à une résolution spatiale de 1 km². Les précipitations spatiales un jour donné sont modélisées par la combinaison d'une loi marginale spatialisée, d'une corrélation spatiale méta-gaussienne censurée, et d'une corrélation temporelle assurant la cohérence des jours successifs. Une originalité du modèle par rapport à d'autres modèles dont RAINSIM est proche tels que ceux de Ailliot et al. [2009] ou Bennett et al. [2018] réside dans le fait que le modèle est conditionné par des types de temps synoptiques. Ainsi, lois marginales [Blanchet et al., 2019] et corrélations spatiales sont tous deux fonctions du type de temps du jour considéré, en se basant sur la classification EDF [Garavaglia et al., 2010]. La dépendance temporelle n'est pas uniquement assurée par la succession des types de temps mais elle est explicitement modélisée. La simulation de champs spatiaux est rendue possible grâce à la spatialisation des paramètres des distributions marginales, qui est effectuée par spline à plaque mince avec dérive externe en altitude [Blanchet et al., 2019]. Les étapes d'estimation de RAINSIM sont donc :

- L'estimation des paramètres des lois marginales par saison et type de temps aux stations.
- La spatialisation de ces paramètres par spline à plaque mince avec dérive externe en altitude, afin d'avoir une distribution marginale en tout point du bassin.
- L'estimation de la corrélation spatiale et temporelle, en gardant les paramètres des lois marginales fixes.

Le modèle a initialement été testé sur le bassin versant de l'Ardèche [Vaithinada Ayar et al., 2020] mais le modèle est générique et adaptable à différents bassins de montagne ayant une superficie de quelques centaines de kilomètres carré à quelques milliers de kilomètres carré. Il a par la suite été appliqué entre autre à la Durance. L'application au bassin versant de l'Isère est nouvelle.

4.3 Choix de la zone d'étude : l'Isère à Grenoble

Théoriquement, le simulateur pourrait générer des champs de précipitation sur l'ensemble du bassin versant de l'Isère et du Drac. Cependant, l'Isère et le Drac ont des climats différents ainsi que des régimes de précipitations assez singuliers. Ainsi il a été décidé de se restreindre au bassin versant de l'Isère à Grenoble, défini par le contour extérieur des entités du shape utilisé par MORDOR-TS sur l'Isère. C'est donc sur le bassin versant de l'Isère à Grenoble université que ce générateur a été calibré (5800 km²). La suite logique serait de refaire la même démarche sur le Drac en tirant profit de l'expérience accumulée sur le bassin versant de l'Isère.

4.4 Choix des stations pluviométriques sur la zone d'étude

Les stations pluviométriques sélectionnées fonctionnent avec un pas de temps journalier. Elles sont un assemblage de stations de Météo-France, de EDF-DTG, ainsi que des stations pluviométriques italiennes. Dans un premier temps, les stations conservées sont situées dans un périmètre de 20 km autour du contour de l'Isère. Dans un second temps, on enlève les stations du sud et de l'est situées à plus de 5 km de la frontière du bassin. En effet une barrière climatique et topographique formée par le piémont à l'est et les Écrins au sud rend les stations éloignées peu pertinentes. Cela se confirme notamment par le découpage climatologique de Auer et al. [2007]. Dans un troisième temps, on ne conserve que les stations ayant au moins 20 ans de données observées sur la période 1985-2018 (cf Figure 25), ceci afin d'avoir à la fois une certaine profondeur temporelle pour que la distribution puisse être bien calée et notamment pour les extrêmes journaliers, et à la fois pour être au plus proche de la pluviométrie actuelle. On obtient un total de 97 stations pluviométriques utilisables pour le simulateur de pluie dont 51 sont situées à l'intérieur du bassin versant soit une station pour 115 km² à l'intérieur du bassin (cf Figure 26). Les stations retenues sont présentes à toutes les altitudes de 270 m à Grenoble jusqu'à 2850 m au Lago della Rossa à l'extrême est de la Vanoise côté italien. L'altitude moyenne de ces pluviomètres est de 1060 m d'altitude.

4.5 Étude de la pluviométrie sur le bassin

4.5.1 Saison à risque hydrologique

Le bassin versant de l'Isère est soumis des précipitations très variables pouvant aller de 475 mm/an à Modane jusqu'à localement plus de 3000 mm/an sur certains sommets de Chartreuse. Il est important de caler finement le générateur de pluie afin que le forçage en précipitation soit le plus près de la réalité sur la période «à risque» hydrologique. Pour déterminer cette période, on utilise les résultats de la première partie. On calcule le débit produit par maille et par jour grâce aux réanalyses SPAZM sur la période 1998-2017. Le débit produit est sommé sur toutes les entités torrentielles (débit produit total) et on obtient ainsi l'histogramme par mois de la Figure 27. Les mois de mai et juin et dans une moindre mesure avril et juillet sont ceux qui créent sur le bassin les plus forts débits produits totaux. Les plus forts débits ont lieu en mai et juin. Il faut donc être particulièrement vigilant avec le calage du simulateur de pluie sur la saison printanière (même si la précipitation n'est souvent pas la seule responsable des crues à cette saisons, la fonte des neiges ayant aussi un impact).

4.5.2 Pluviométrie par saison et type de temps

Le simulateur de pluie RAINSIM cale les distributions d'intensité de pluie, l'occurrence de pluie et la corrélation spatiale par saison et type de temps. Deux contraintes s'imposent sur ces classes. Plus les distributions sont calées sur un échantillon faible, meilleure sera l'ajustement à ces données (faible biais). Cependant, plus l'échantillon est faible, plus la variance est forte. Ainsi, il faut trouver un

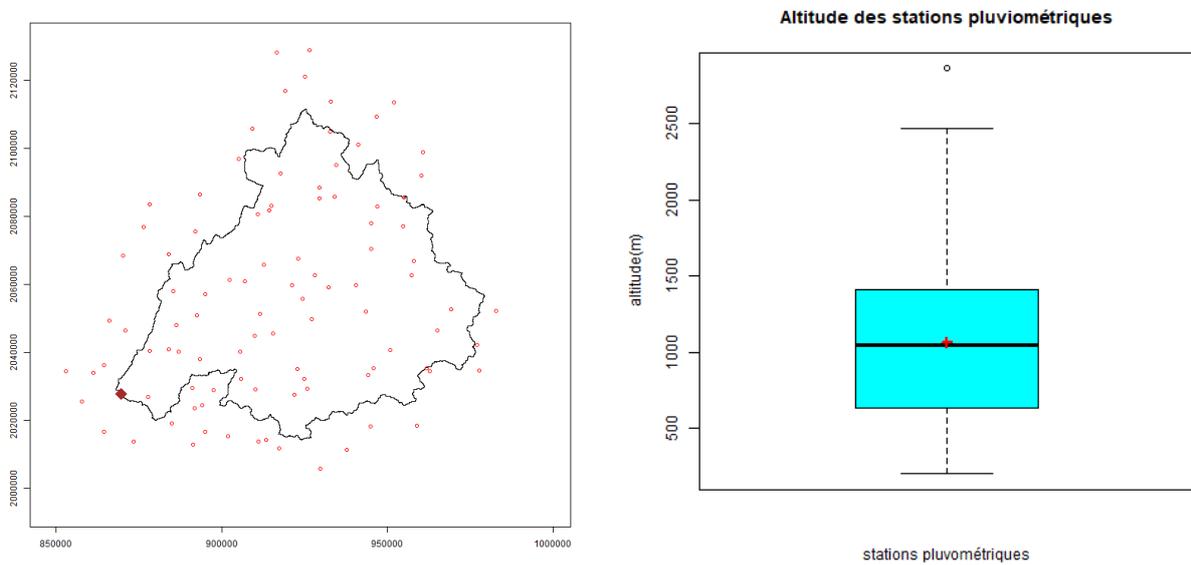


FIGURE 26 – Gauche : localisation des 97 stations retenues. Droite : Altitude (m) des 97 stations.

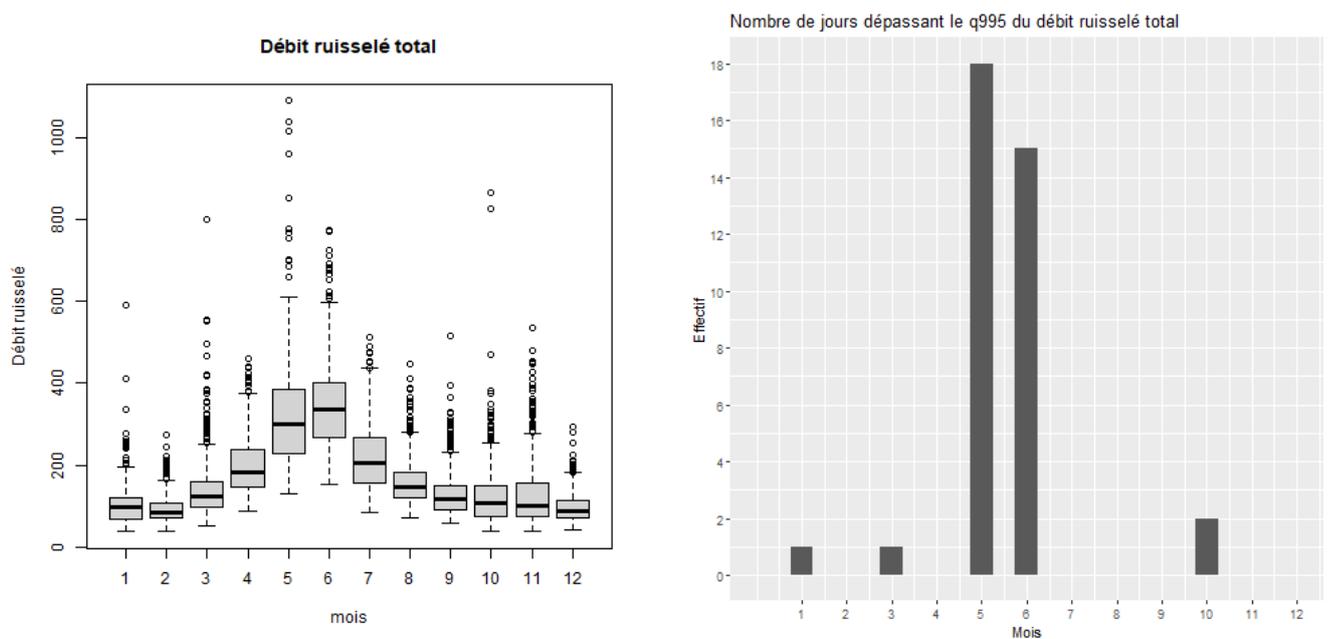


FIGURE 27 – Gauche : Débit produit total par jour grâce aux réanalyses SPAZM sur la période 1998-2017. Droite : Nombre de jours où le débit produit total dépasse son quantile 99.

compromis pour saisir la plus grande partie de la variabilité sans trop limiter le jeu de données sur lequel les distributions viendront se caler. Un optimum doit se trouver entre trois et quatre saisons sur notre bassin sachant que les bassins au sud et à l'est ont un régime de pluie saisonnier assez différent de ceux du nord et de l'ouest.

La Figure 28 montre la fréquence des jours pluvieux, l'intensité moyenne des jours de pluie et la fréquence au dépassement du quantile 99 pour les stations sélectionnées. Il en ressort que les mois de printemps (avril, mai, juin) sont ceux où il pleut le plus souvent sur le bassin de l'Isère. De plus, l'intensité moyenne de la pluie ainsi que la fréquence de dépassement du quantile de pluie q99 est le plus fort sur la fin d'été et la saison d'automne (septembre, octobre, novembre).

Les types des temps utilisés dans RAINSIM ont été obtenus dans Garavaglia et al. [2011] par classification des journées pluvieuses en 7 types de temps en fonction de la circulation synoptique générant ces pluies et ajout d'une classe sèche (anticyclonique). Il en ressort une classification de huit types de temps (cf Figure 29). La Figure 30 montre la forte variabilité des variables étudiées en fonction du type de temps. Les types de temps (1,2) et (6,7) sont les types pour lesquels la pluie est la plus fréquente, d'intensité la plus forte et dépassant le plus souvent le quantile 99 de précipitation. Il est donc nécessaire d'être attentif sur les regroupements faits avec ces types de temps.

4.5.3 Répartition spatiale de la pluviométrie par saison et type de temps

La Figure 31 montre que les mois de printemps ont une forte hétérogénéité dans la répartition géographique de la fréquence de pluie. Les bassins du nord et de l'ouest ont une probabilité de pluie entre 30 et 50% quand ceux du sud et de l'est sont plus proches de 20% (à part l'extrême est du bassin). De plus, l'intensité de la pluie est une variable fortement variable spatialement et notamment en été où l'intensité moyenne peut varier du simple au triple en fonction de la localisation du pluviomètre. Enfin la saisonnalité influence fortement la répartition des forts quantiles de pluie. Si pendant l'hiver, les fortes pluies se retrouvent principalement sur la Vanoise et les massifs intérieurs du bassin, pendant l'été, ces fortes pluies se retrouvent principalement sur la frontière ouest du bassin soit les Bauges, la Chartreuse et le nord du Vercors.

La Figure 32 montre que les types de temps génèrent des répartitions géographiques de la fréquence de jour pluvieux assez caractéristiques. Les types de temps anticycloniques et flux de sud (types de temps 8 et 4) provoquent très peu de jours de pluie sur l'ensemble du bassin de l'Isère. Les types de temps océaniques (1 et 2) divisent le bassin entre le nord-ouest fortement pluvieux et le sud-est plus sec. Le retour d'est (6) est associé à une forte fréquence de jours pluvieux sur l'extrême sud-est du bassin. Enfin la dépression centrale (7) est associée à des pluies sur tout le périmètre du bassin et de façon plus marginale dans la Vanoise.

De plus, il existe une très forte hétérogénéité spatiale des intensités moyennes de pluie en fonction du type de temps qui peut varier du simple au quadruple sur le bassin. Ces motifs permettent de voir que les types de temps océaniques 1 et 2 ainsi que ceux méditerranéen 6 et 7 sont les plus à même de provoquer de fortes intensités de pluie sur l'ensemble des stations (pas forcément de façon simultanée). Les types de temps 4, 5, 8 ont une intensité moyenne plus faible.

Enfin le type de temps induit sur le bassin une forte hétérogénéité de dépassement de quantile 99. Les types de temps 3, 4, 5, 8 ne génèrent que peu de fortes pluies. Le type de temps retour d'est (6) génère à l'est une fréquence de dépassement du quantile 99 de 3 à 5%. La dépression centrale (7) génère au sud et au sud-ouest une fréquence de dépassement du quantile 99 de 2 à 3%. Pour le type de

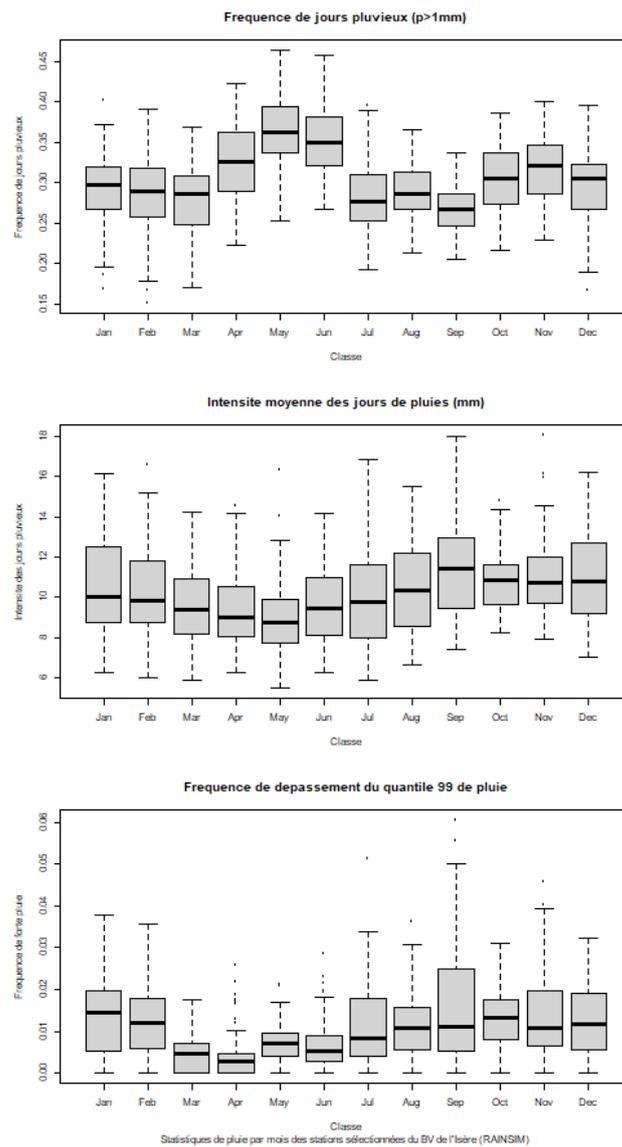


FIGURE 28 – Fréquence des jours pluvieux (haut), intensité moyenne des jours de pluie (mm, milieu) et fréquence au dépassement du quantile 99 (bas) pour les stations sélectionnées, par mois.

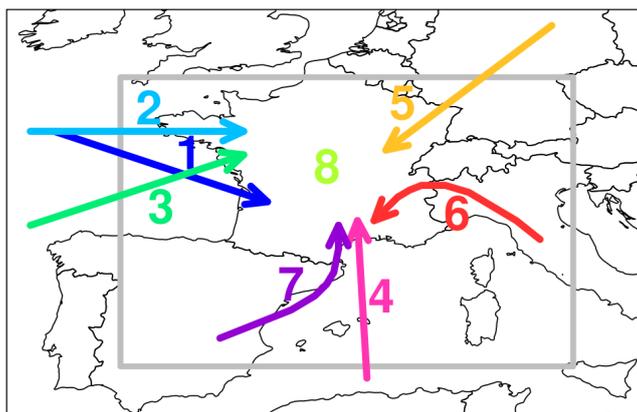


FIGURE 29 – Schématisation des flux des types de temps EDF. Les types de temps 1,2,3 sont des types de temps océaniques. Les types de temps 4, 6 et 7 sont des types de temps méditerranéens, le type de temps 6 étant un retour d’est. Le type de temps 5 est continental. Le type de temps 8 est anticyclonique.

temps 1 (vague atlantique), la probabilité de dépassement de quantile 99 est de 2 à 3% au sud-ouest. Enfin pour l’océanique stable (2), la probabilité de dépassement de quantile 99 est de 1.5 à 3% sur la majeure partie du bassin. On remarque donc ici que les types de temps générant des fortes pluies touchent de façon très hétérogène les différentes régions du bassin.

Il est difficile à partir de ces graphiques de tirer des conclusions franches pour grouper les mois et saisons entre eux. Ces figures servent surtout à illustrer la grande variabilité au sein du bassin versant. Elles peuvent aussi aider à comprendre *a posteriori* les biais des ajustements des distributions sur certaines stations.

4.6 Mise en place opérationnelle

4.6.1 Choix des saisons

Le choix des saisons a une influence très forte sur la capacité du simulateur de pluie de savoir reproduire les régimes mensuels de pluie par station. Savoir reproduire correctement ces régimes mensuels est une condition nécessaire à l’obtention de simulation de cumuls pluviométriques pertinents pour pouvoir faire des simulations hydrologiques pertinentes. Cette partie du travail s’est faite en regardant les graphiques précédents et en groupant de façon qualitative les mois les plus ressemblants. Le travail ensuite a été de tester et comparer différentes combinaisons de saisons dans le simulateur, en utilisant comme regroupement de types de temps 123 / 467 / 58 qui est le regroupement classique d’EDF (cf Section 4.6.2). Les étapes de la comparaison sont i) l’estimation de RAINSIM à partir des 91 stations sélectionnées, pour le regroupement de saisons choisi, ii) la simulation de 100 séries ”fictives” pour la série des types de temps observée sur 1985-2018, iii) l’analyse des graphiques de régimes mensuels pour valider un groupement et disqualifier les autres. Il est nécessaire de noter que groupement par saison et groupement par type de temps ne sont pas indépendants et donc que l’ensemble des possibilités n’a pas été testé.

Différents regroupements saisonniers ont été testés (Figure 33), d’abord avec trois saisons puis avec quatre. Trois saisons aurait permis d’avoir plus d’effectifs dans chaque classe et donc d’avoir plus de possibilités de regroupement ensuite par type de temps. Cependant, il s’avère que les groupements en trois saisons n’arrivent pas à représenter correctement les régimes de pluie spécialement pour les mois

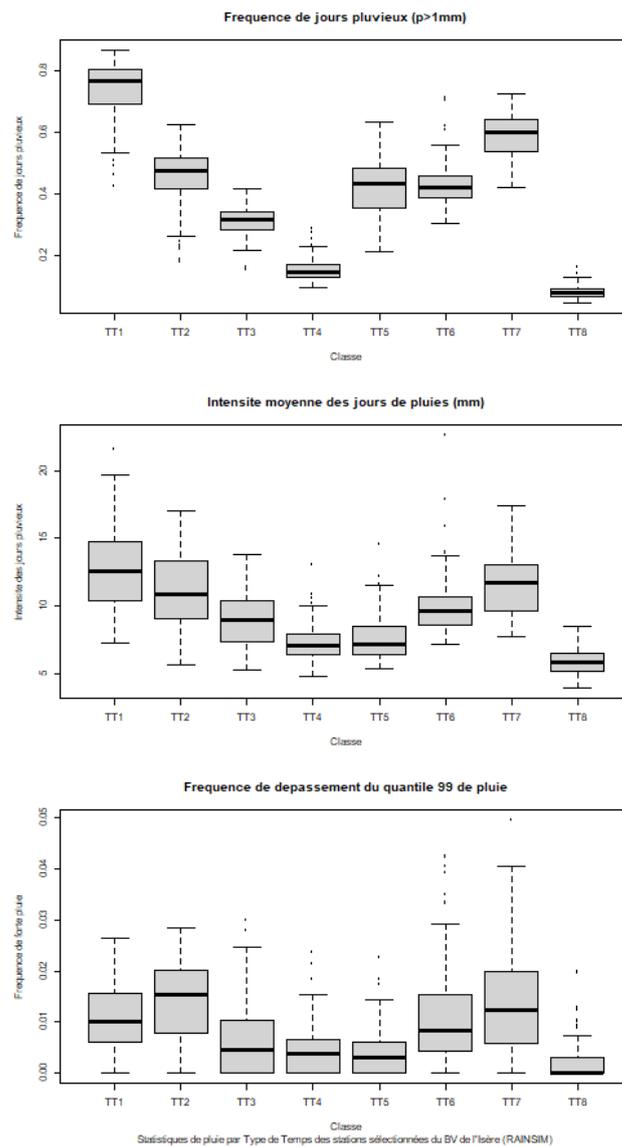


FIGURE 30 – Fréquence des jours pluvieux (haut), intensité moyenne des jours de pluie (mm, milieu) et fréquence au dépassement du quantile 99 (bas) pour les stations sélectionnées, par type de temps.

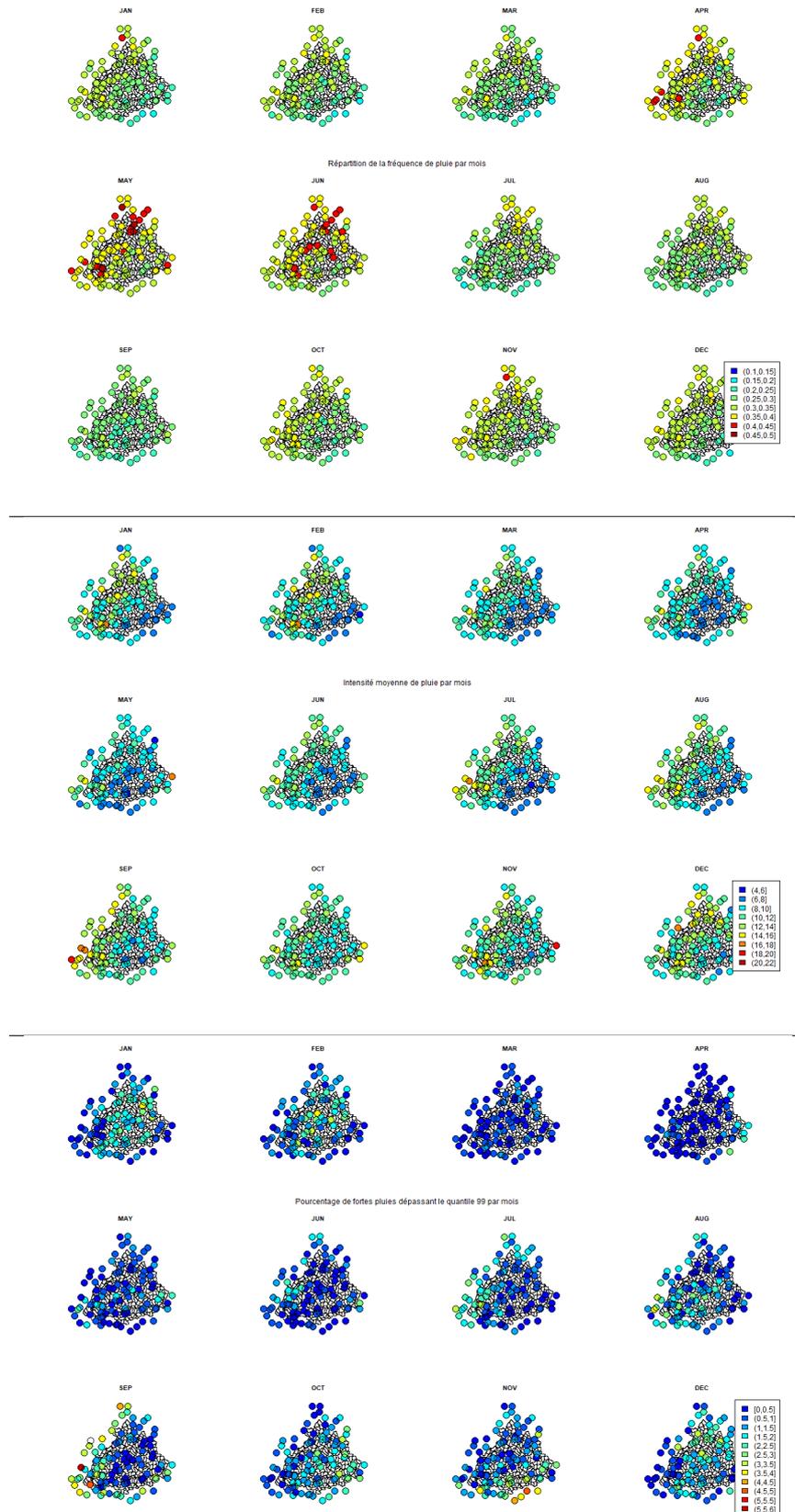


FIGURE 31 – Statistiques mensuelles pour les stations sélectionnées.

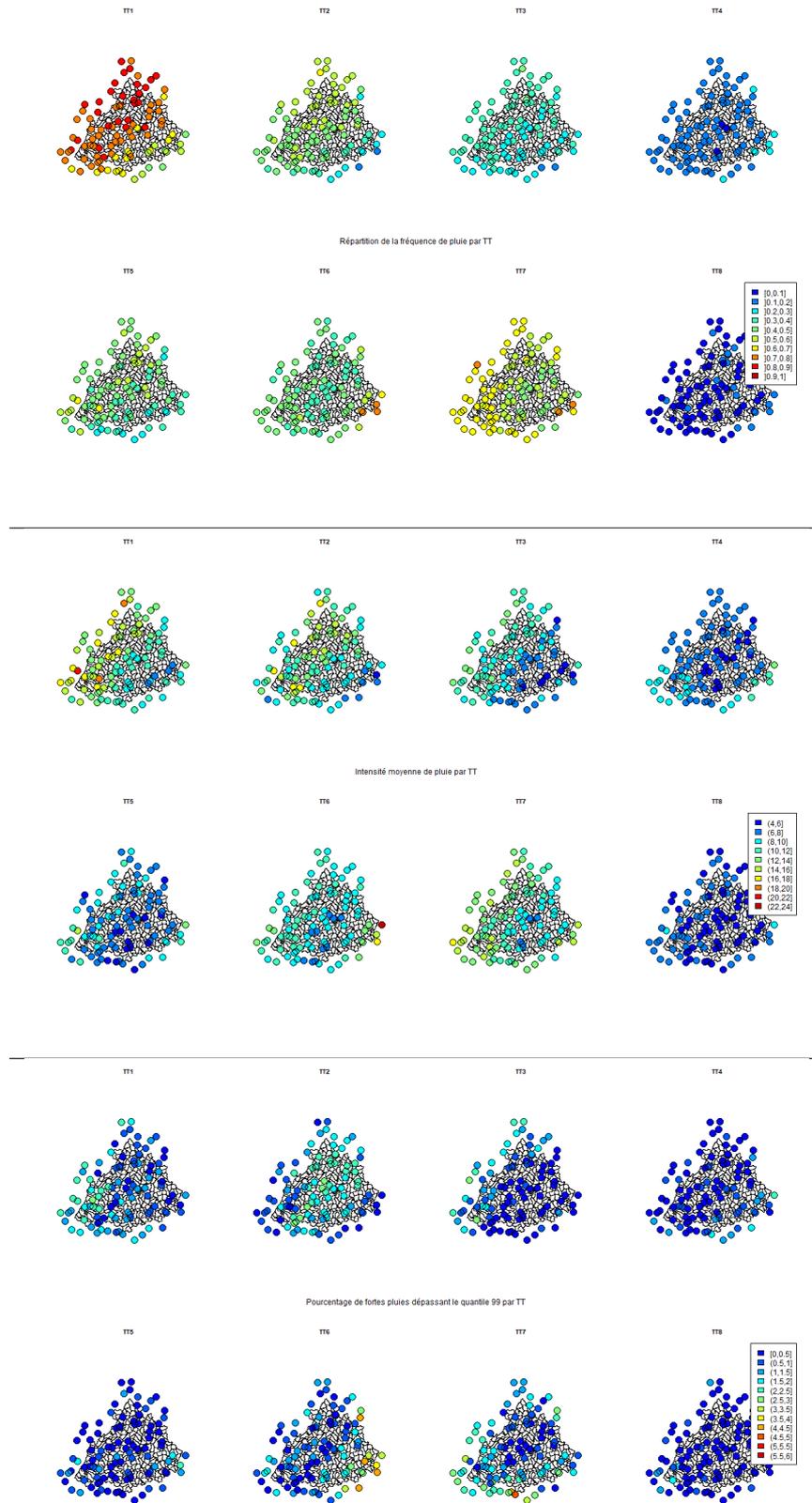


FIGURE 32 – Statistiques par type de temps pour les stations sélectionnées.

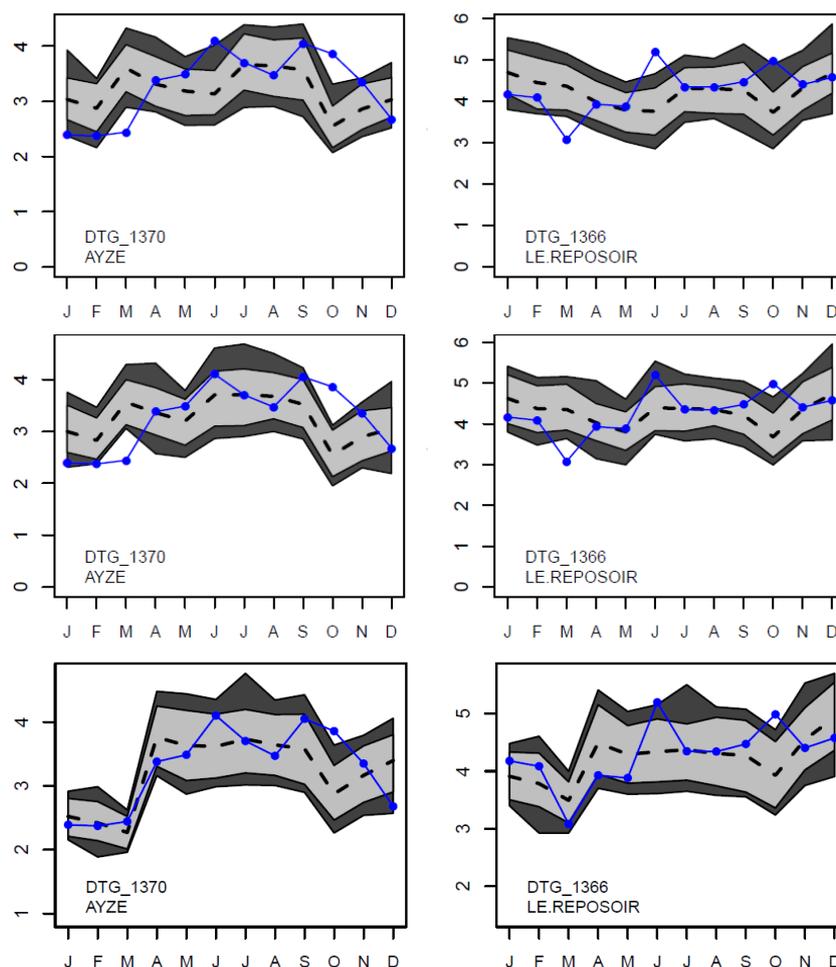


FIGURE 33 – Régime mensuel simulé par RAINSIM pour 2 stations. Les 100 simulations forment le bandeau gris/ noir tandis que la ligne bleue représente les régimes observés sur la station. Haut : regroupement en 3 saisons MAMJ / JAS / ONDJF. Milieu : regroupement en 3 saisons MAM / JJAS / ONDJF. Bas : regroupement en 4 saisons JFM / AMJ / JAS / OND.

de mai, juin et d'octobre. Le regroupement en quatre saisons JFM / AMJ / JAS / OND est retenu pour la suite.

4.6.2 Regroupement des types de temps

Les groupements par type de temps sont très contraints par les effectifs dans chaque classe. Il s'avère que certaines classes importantes sont peu fréquentes dans la climatologie des années 1985 à 2017 (Figure 34).

Les types de temps méditerranéen 6 et 7 représentent à eux deux moins d'un dixième de l'ensemble des types de temps. S'ajoute à cela la variabilité de l'occurrence de ces types de temps au cours de l'année puisque ces types de temps sont moins fréquents en hiver que le reste de l'année. Ainsi le groupement par classe de type de temps est très contraint par les effectifs.

Un groupement prometteur selon les graphiques précédents serait le suivant (123 / 67 / 458). Il divise la classification sur l'Isère en GT1 : «circulation pluvieuse océanique», GT2 : «circulation

Effectifs des différents types de temps dans la climatologie

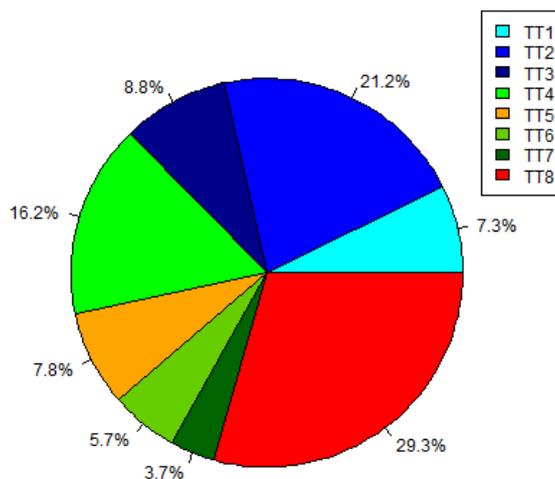


FIGURE 34 – Répartition des types de temps sur la période 1985-2017.

pluvieuse méditerranéenne» et GT3 : «circulation peu pluvieuse». Néanmoins, cette classification n'est pas retenue malgré sa pertinence car la classe GT2 a un effectif trop faible notamment en hiver.

Un second groupement prometteur est celui utilisé souvent par EDF (123 / 467 / 58). Il divise la classification sur l'Isère en GT1 : «circulation océanique», GT2 : «circulation méditerranéenne», GT3 : «circulation peu marquée». Cette classification se révèle fonctionnelle avec des effectifs bien répartis. On regrette cependant que le flux de sud (4) très peu pluvieux se retrouve avec la dépression centrale et le retour d'est qui génèrent de forts événements sur une partie importante du bassin. C'est ce regroupement de types de temps qui est retenu pour la suite (NB : c'est celui utilisé dans la Figure 33).

4.6.3 Choix des modèles de corrélation

Le modèle de covariance spécifie le type de dépendance spatiale des champs de précipitation un jour donné. Il est possible d'utiliser RAINSIM avec une covariance isotrope ou anisotrope géométrique [Vaittinada Ayar et al., 2020]. Les simulations ci-dessous sont faites avec une covariance anisotrope. Faute de temps, la comparaison avec une covariance isotrope n'a pu être effectuée mais nos premiers essais montrent que la différence entre les deux choix est faible.

Pour l'autocorrélation temporelle spécifiant la dépendance entre les champs de précipitation d'un jour et de son lendemain, deux classes d'intensité sont considérées, c'est-à-dire que la corrélation avec le lendemain dépend également du fait que le jour J était, à l'échelle du bassin, un jour intense ou non. Ce raffinement par rapport à la version initiale de [Vaittinada Ayar et al., 2020] à une seule classe d'intensité semble significativement améliorer les résultats.

4.6.4 Couplage au modèle pluie-débit MORDOR-TS

Le couplage avec le modèle hydrologique consiste à générer les forçages d'entrée pluviométriques et de températures pour le modèle hydrologique MORDOR-TS.

Les forçage en précipitation sont obtenus par RAINSIM en "rejouant" plusieurs fois la série de dates et de types de temps observés sur 1985-2017, puis en intégrant les précipitations grillées sur les entités

de MORDOR-TS.

Les champs de températures sont générés conditionnellement au champ de précipitation simulé. En effet, pour les simulations hydrologiques, et particulièrement en zone de montagne, il est essentiel de préserver les corrélations pluie-températures des chroniques simulées. Les simulations RAINSIM sont réalisées en parcourant plusieurs fois la chronique de date et de TT de la base d'observations. En gardant telles quelles les températures observées, on brise donc la dépendance pluie-température. Celle-ci est significative pour les événements intenses, avec, très grossièrement des températures plus chaudes lors des événements pluvieux de la saison froide que lors des périodes sèches, et à l'inverse des températures plus froides lors des épisodes en saison chaude. La méthode de simulation des températures utilisée ici se base sur la méthode des analogues, par re-échantillonnage des dates des observations de températures pour constituer une chronique de champs de température mieux adaptée à une simulation donnée. En « recyclant » les champs observés, on conserve les caractéristiques spatiales de ceux-ci, sans avoir à les remodeler. La méthode consiste à diviser les journées simulées en trois classes (sèche, faiblement pluvieuse, fortement pluvieuse), et, pour les deux classes pluvieuses, de proposer, pour la date de simulation, une autre date, issue de la chronique observée, pour le champ de température associé, basée sur les critères de proximité suivants :

- Année de la date proposée dans un intervalle de plus ou moins 7 ans de l'année de simulation (pour ne pas « briser » la tendance globale au réchauffement)
- Jour julien dans un intervalle de plus ou moins 15 jours de la journée de simulation (pour respecter la saisonnalité)
- Classe pluvieuse du jour et de la veille identiques
- TT du jour et TT de la veille sont identiques

Si aucune journée n'est candidate avec tous les critères, on abandonne le « dernier » critère, puis l'avant-dernier, etc.

5 Performances du simulateur de pluie RAINSIM sur l'Isère

5.1 Performances locales de la simulation en multi-site

Une première analyse des performances du simulateur de pluie consiste à évaluer les simulations multi-site qui sont générées directement aux différentes stations sans étape de spatialisation. Cette simulation multi-site (M) diffère de la simulation champ (F) sur deux points :

- Les précipitations journalières sont uniquement simulées aux localisations des stations.
- Pour cela, les paramètres des lois marginales estimées aux stations sont utilisées. Il n'y a donc pas d'étape de spatialisation par spline des paramètres marginaux [cf Blanchet et al., 2019].

Il est important de noter que ce schéma de simulation multi-site ne permet pas de valider l'interpolation spatiale des lois marginales par spline. Ce point fait l'objet de la section suivante. 100 jeux de simulation sont effectués sur 1985-2017.

La Figure 35 montre les performances des simulations multi-site en moyenne et écart-type pour chaque station. Notons que ces statistiques étant locales, la comparaison de la Figure 35 revient à valider les distributions marginales de RAINSIM. Comme attendu, la figure montre que dans les deux cas, la moyenne des cumuls annuel moyen (PAM) aux stations est très proche de celle observée. L'écart-type du cumul annuel moyen est correctement reconstitué puisque le coefficient de corrélation est entre 60 et 70%. On peut voir que certaines stations avec un fort écart-type en cumul annuel dégradent

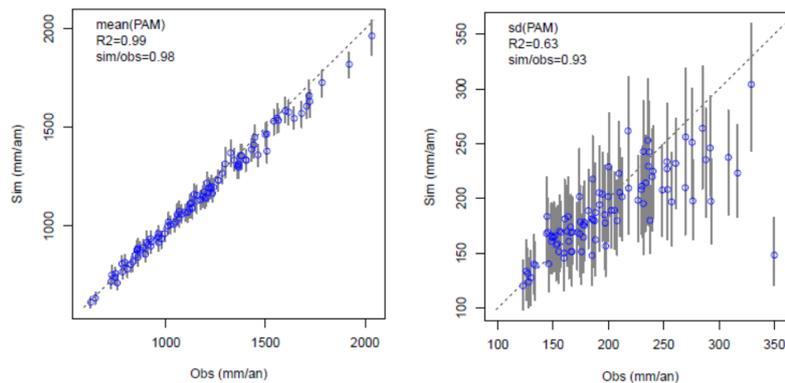


FIGURE 35 – Performances des simulations multi-sites en moyenne et en écart type. Les points bleus montrent en ordonnée la moyenne des 100 simulations RAINSIM. Les intervalles grisés montrent les plages de valeurs prises par les 100 simulations RAINSIM.

fortement le coefficient de corrélation. A noter que ici toutes les stations sont utilisées. Il pourrait être intéressant de regarder plus spécifiquement les performances des stations à l'intérieur du bassin.

Il est aussi nécessaire de pouvoir valider sur chaque station la capacité du modèle à reproduire le régime saisonnier de précipitations. Il s'agit ici de valider les stations situées à l'intérieur du domaine (Vanoise, Tarentaise, Belledonne, Chartreuse, Bauges) dans leur ensemble et de ne pas tenir compte des climatologies très locales comme en haute Tarentaise. On choisit ici Ugine, Tigne, Eau rousse, La rochette, Aussois. On montre en Figure 36 les régimes mensuels pour ces stations. Comme déjà montré en Figure 33, les régimes aux stations sont relativement bien reproduits aux stations avec la classification en quatre saisons et en trois types de temps.

5.2 Performances locales de la simulation en champ de pluie

On utilise ici la version "simulation de champs spatiaux" de RAINSIM. Pour des raisons de temps de calcul, les champs sont simulés à l'échelle 9 et 25 km². 100 séries de simulations sont effectuées sur 1985-2017.

Pour évaluer les performances de ce simulateur, on génère les champs de pluie journaliers et on extrait les précipitations au centre des points de grille contenant les stations. La comparaison de cette extraction et de la simulation multi-site de la Section 5.1 permet d'appréhender les pertes d'informations générées par l'interpolation des paramètres marginaux. Notons néanmoins que les paramètres n'étant pas extraits exactement aux stations mais au centre des points de grilles les plus proches, à l'effet de l'interpolation se mêle l'effet de n'être pas exactement aux bonnes coordonnées.

Les résultats (non montrés) révèlent que ce double effet (interpolation + différence de coordonnées) impacte modérément les performances locales comme celles des Figures 35 et 36. L'effet de la résolution spatiale (9 ou 25 km²) semble également peu impacter ces performances. L'étape permettant de qualifier en performance hydrologique le gain d'une grille de meilleure résolution n'a pas été mené au cours de ce travail mais permettrait de mieux comprendre la perte d'information lors de la perte de résolution. Dans la suite, seule la résolution à 25 km² est utilisée.

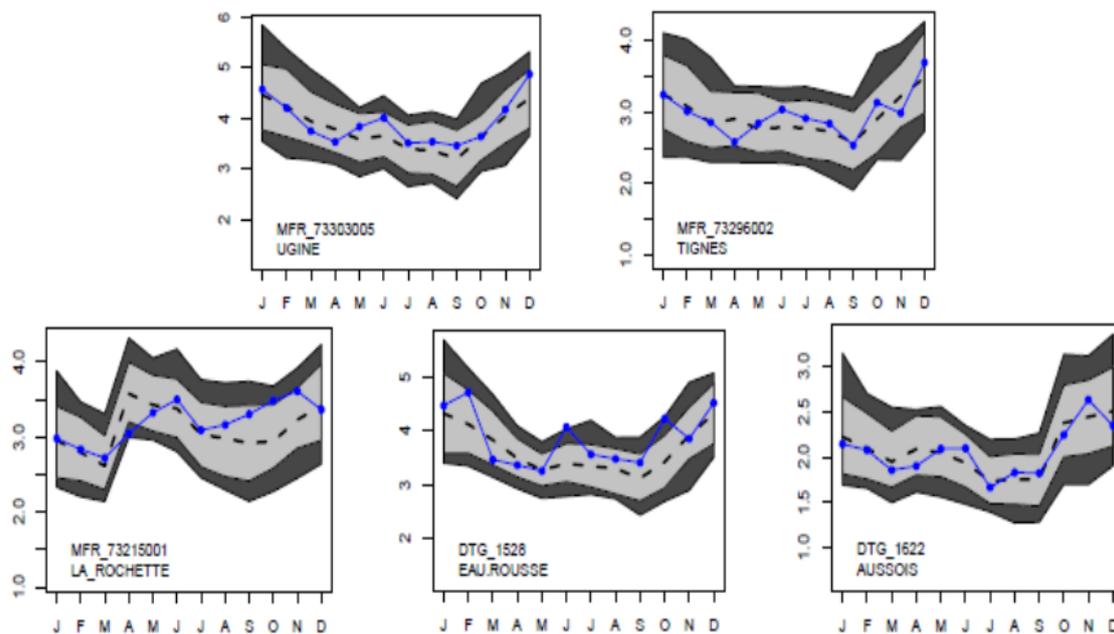


FIGURE 36 – Régimes mensuels de précipitations sur certaines stations du bassin de l'Isère. Les courbes bleues indiquent les régimes observés. Les courbes en gris pointillé indiquent les régimes moyens simulés. Les intervalles inter-quantiles gris clair et gris foncé correspondent aux quantiles [0.25, 0.75] et [0.1, 0.9] respectivement.

5.3 Performances de la simulation en champ de pluie sur le bassin

Le simulateur de champs de pluie a pour vocation d'être utilisé en entrée du modèle hydrologique MORDOR-TS. Ce modèle hydrologique a été calibré sur les réanalyses pluviométriques SPAZM de façon à reconstituer les débits observés. Les réanalyses SPAZM sont donc le champ de pluie que nous utilisons comme référence par la suite. Une analyse pertinente consiste à observer le cumul mensuel interannuel simulé sur le bassin entier et à le comparer à la réanalyse SPAZM. Dans notre cas, la comparaison est faite entre le cumul mensuel interannuel SPAZM avec une résolution de 1 km², le cumul mensuel SPAZM avec une résolution de 25 km² identique à celle de la simulation et le cumul mensuel de la simulation RAINSIM avec une résolution de 25km².

La Figure 37 montre que le cumul mensuel interannuel de SPAZM au km² et celui de SPAZM sur la grille de la simulation (25 km²) sont très proches sur l'ensemble de la période. La dégradation de la qualité du champ due à une résolution moins grande n'est pas très significative sur les mois d'hiver mais est importante surtout au printemps et en automne.

L'explication de cette différence du cumul annuel entre les champs SPAZM et RAINSIM sur l'Isère (Figure 37) provient pour une partie importante de l'effet de l'altitude sur les précipitations. On sait que le gradient SPAZM de précipitations en fonction de l'altitude est important. Or le bassin de l'Isère est un bassin en altitude avec 30% des pixels de 1 km² ayant une altitude supérieure à 2000 m. La Figure 38 montre que SPAZM et RAINSIM diffèrent beaucoup en cumul annuel notamment à partir de 2000 m. Or seulement deux pluviomètres sont installés à une altitude supérieure à 2000 m à l'intérieur de notre bassin et quatre si l'on prend aussi les pluviomètres utilisés hors du bassin. Ainsi seuls les nivo-pluvió-totalisateurs (TOT) peuvent faire référence pour confirmer l'un ou l'autre des gradients de précipitation orographique. On peut voir sur la Figure 38 que ceux-ci ne s'approchent pas plus de

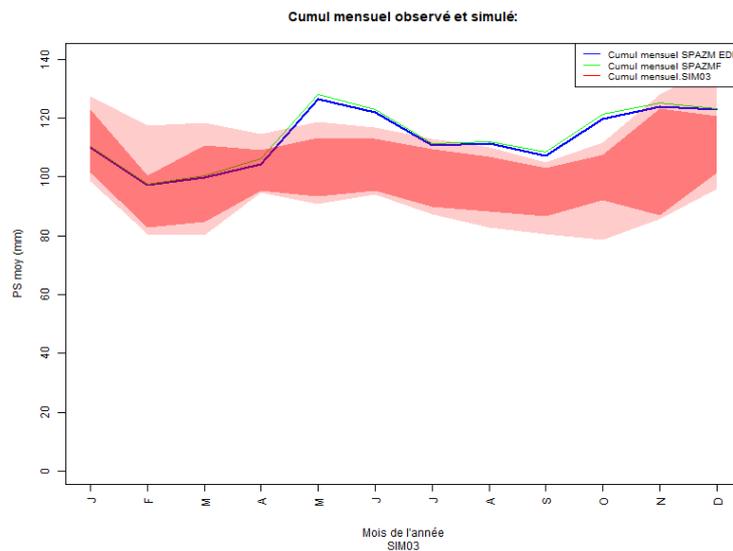


FIGURE 37 – Cumul mensuel interannuel pour SPAZM sur le bassin de l'Isère à Grenoble au km² (courbe bleue), SPAZM dégradé à 25 km² (courbe verte), et les minimum et maximum des cumuls mensuels interannuels de 100 simulations RAINSIM (sans correction) à 25 km² ainsi que les quantiles 10 et 90 associés (enveloppe rouge clair et rouge foncé).

SPAZM que de RAINSIM avec une variabilité interne très élevée. De plus on constate sur la Figure 39 que c'est sur les saisons du printemps et d'automne que les différences de précipitations en altitude sont les plus marquées avec un cumul SPAZM systématiquement supérieur au cumul RAINSIM.

La comparaison des cumuls annuels SPAZM et RAINSIM aux points où nous avons des observations (stations et totalisateurs) sur la Figure 40 montre que le cumul annuel SPAZM ne se rapproche pas plus des observations que le cumul annuel des champs RAINSIM. Les nivo-pluvio-totalisateurs (TOT) sur la période (1957-1973) ont un cumul annuel très hétérogène et assez éloigné de SPAZM sur la période (1986-2017), et ce bien que les réanalyses SPAZM utilisent ces données. Si la différence des périodes temporelles peut avoir un impact, il est peu probable qu'elle explique l'amplitude de la différence entre le cumul annuel SPAZM et celui des totalisateurs. On sait par ailleurs que ces totalisateurs sont difficiles à opérer ce qui peut amoindrir la fiabilité de ces données.

Enfin la comparaison par entités (Figure 41) que le pic de la distribution RAINSIM d'une centaine d'entités se trouve pour un cumul de 1000 à 1250 mm/an tandis que celui de la distribution SPAZM au km² se trouve pour un cumul de 1250 à 1500 mm/an. La différence des cumuls se retrouve bien également au niveau des entités.

5.4 Performances en hydrologie

La forte différence en précipitation entre SPAZM et RAINSIM a des effets directs sur l'hydrologie en sortie du modèle avec un déficit en débit pendant l'été et l'automne (Figure 42) qui est principalement imputable à une lame de fonte bien moins importante du fait de la "sous-estimation" des précipitations RAINSIM en altitude par rapport à SPAZM. Rappelons ici que MORDOR-TS a été calibré sur SPAZM. Le déficit de la Figure 42 n'implique donc pas nécessairement que RAINSIM sous-estime les "vraies" précipitations mais que sa sous-estimation par rapport à SPAZM utilisée pour la calibration rend son utilisation dans MORDOR-TS biaisée.

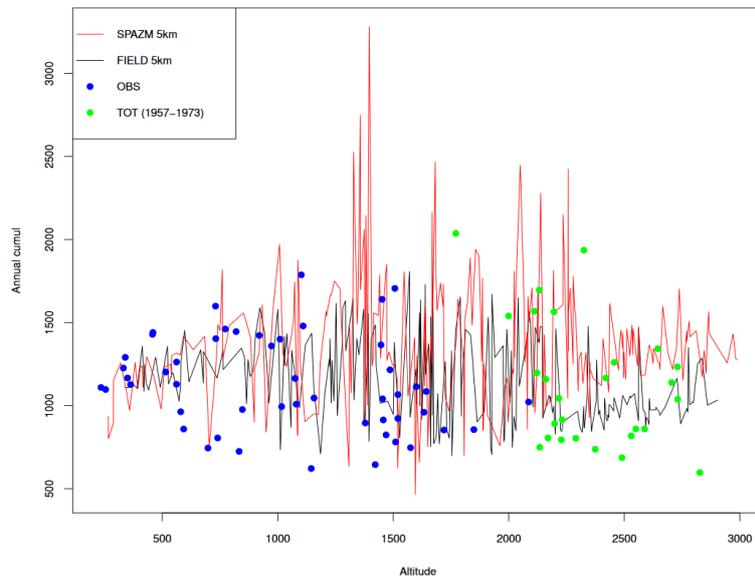


FIGURE 38 – Cumul annuel moyen de SPAZM et RAINSIM (“FIELD”) sur la grille de simulation ($5 \times 5\text{km}^2$) en fonction de l’altitude. Les points bleus montrent les stations et les points verts les nivo-pluvio-totalisateurs.

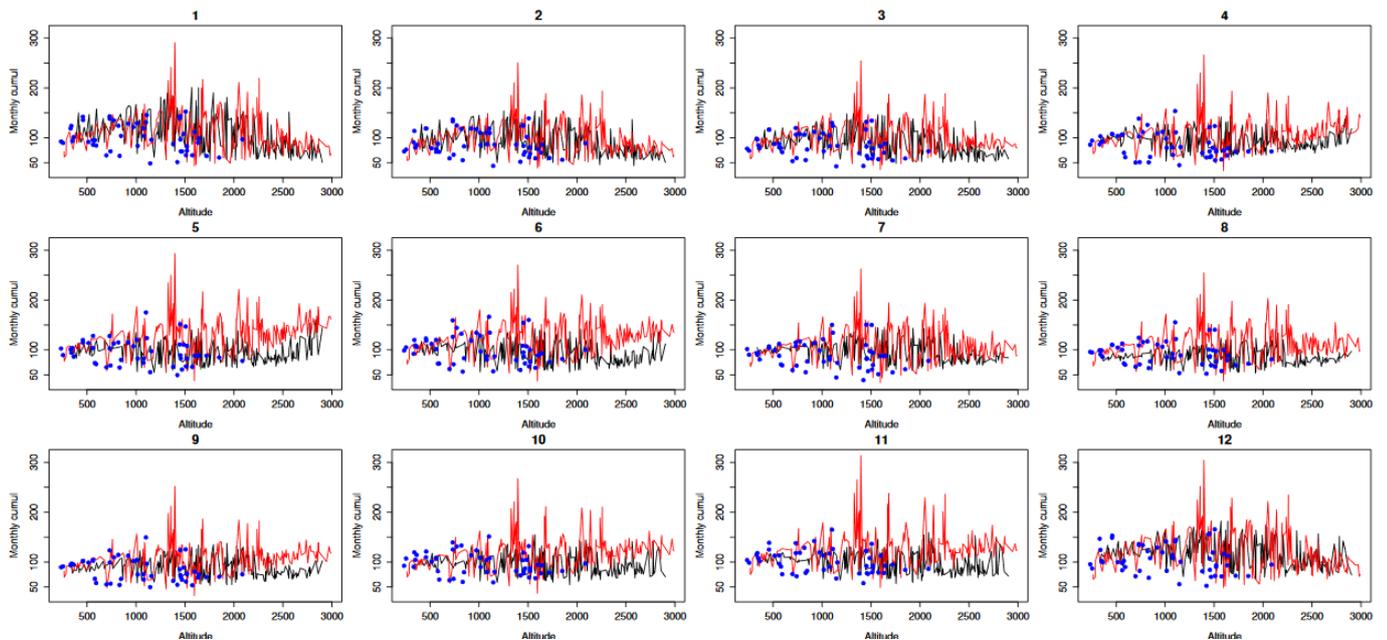


FIGURE 39 – Comme en Figure 38 par mois. Les totalisateurs n’apparaissent pas puisqu’ils ne fournissent que des cumuls annuels.

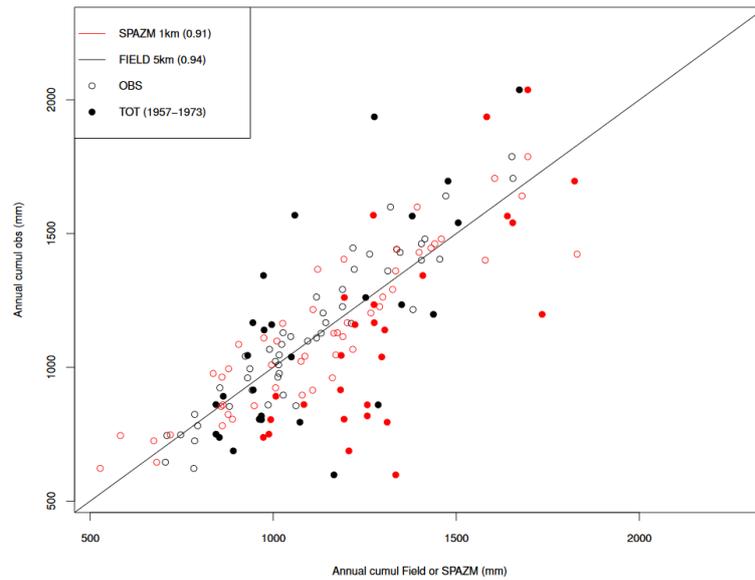


FIGURE 40 – Comparaison des cumuls annuels des 51 stations (points vides) et des 25 totalisateurs (points pleins) situés à l’intérieur du bassin de l’Isère aux extractions SPAZM 1km² (rouge) et RAINSIM (“FIELD”) 25 km² (noir).

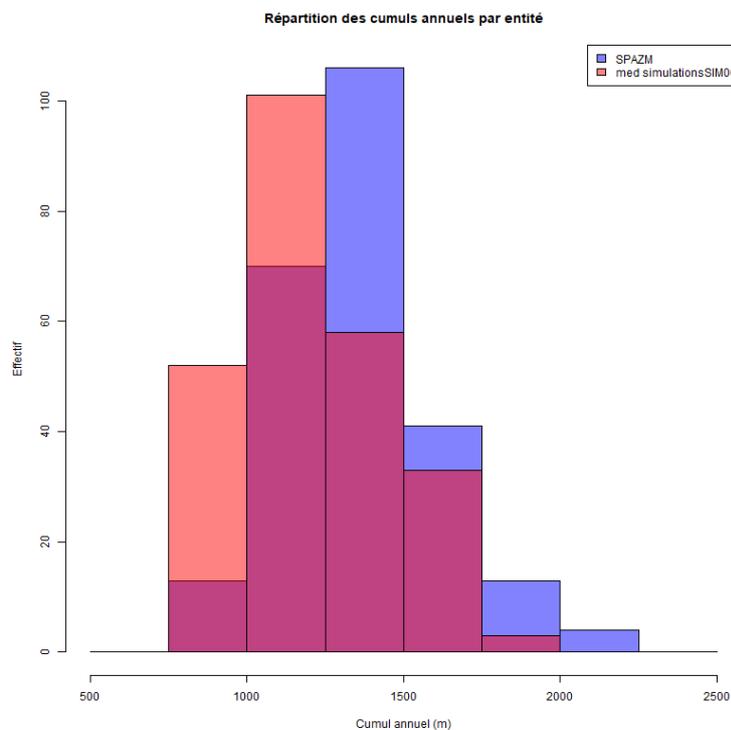


FIGURE 41 – Répartition du cumul annuel moyen (mm) par entité pour les réanalyses SPAZM au km² intégrées par entité par rapport aux simulations RAINSIM à 25 km² sur les années 1986-2017.

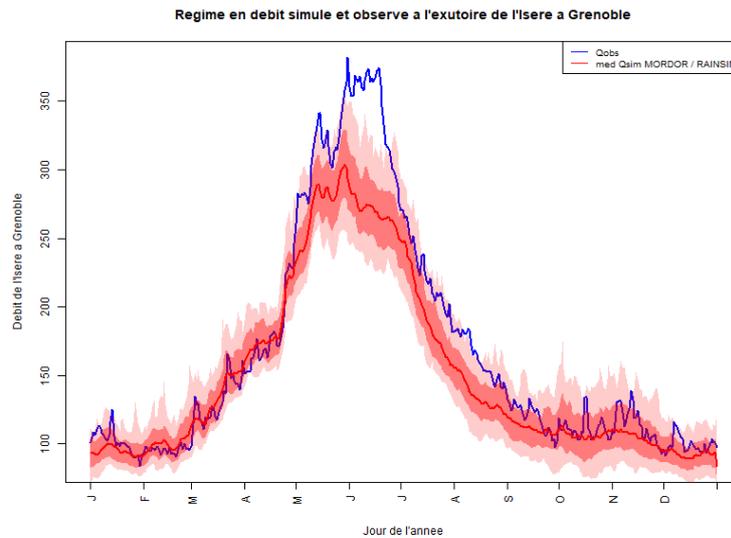


FIGURE 42 – Régime en débit de l’Isère à Grenoble en sortie du modèle hydrologique MORDOR-TS avec pour forçage les simulations RAINSIM non corrigées et les températures SPAZM. Bleu : les observations. Rouge : avec les 100 simulations RAINSIM.

5.5 Adaptation du cumul RAINSIM pour la simulation hydrologique

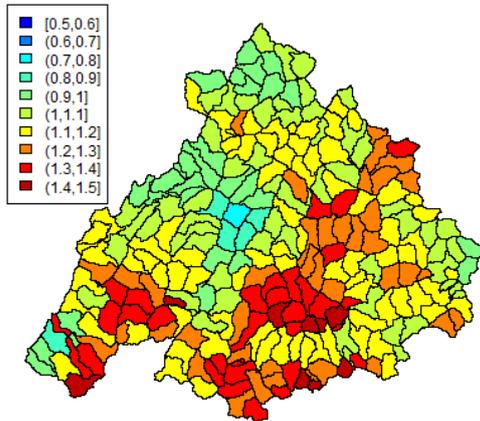
Dans la perspective d’obtenir une simulation hydrologique performante, il est donc nécessaire que le forçage pluviométrique RAINSIM se rapproche du forçage sur lequel a été calé MORDOR-TS. Ainsi la différence de précipitation en altitude entre les simulations RAINSIM et SPAZM doit être corrigée pour générer des débits cohérents. La correction des précipitations par entité est choisie dans un premier temps pour sa simplicité de réalisation et d’interprétation. La précipitation simulée un jour donné pour une entité i est ”corrigée” en la multipliant par

$$C_{pr}(i) = \frac{\text{cumul annuel moyen SPAZM}(i)}{\text{cumul annuel moyen RAINSIM}(i)}.$$

Ainsi les cumul annuels moyens de chaque entité de RAINSIM corrigé coïncident avec les cumuls annuels moyens de SPAZM. C’est une correction simple qui s’effectue en dehors du simulateur de pluie et qui permet une interprétation aisée. La carte du correctif C_{pr} (Figure 43) montre que le correctif plafonne à 1.5 ce qui est important (pour 1.5, le cumul annuel de RAINSIM est augmenté de 50%). La répartition géographique des forts C_{pr} est hétérogène. Les C_{pr} forts se retrouvent dans des entités de haute altitude et notamment en Maurienne dans le massif de Belledone et en Oisans qui correspond aussi partiellement à des zones mal couvertes par les pluviomètres. La répartition du correctif par altitude moyenne de maille (Figure 43) vient souligner l’importance de l’altitude dans l’attribution d’un correctif pour rapprocher RAINSIM de SPAZM. Il est à noter que cette correction vient s’ajouter à la correction interne à MORDOR-TS, C_p , dont la Figure 44 montre la carte. La correction C_{pr} revient ainsi à utiliser dans MORDOR une autre carte de correction (rappelons que la carte C_p a été élaborée pour SPAZM).

On vérifie sur la Figure 45 que la correction a bien recentré le bandeau de simulations RAINSIM des cumuls mensuels autour des réanalyses SPAZM.

Carte du correctif du cumul annuel SPAZM/sim par entité. SIM06



Coefficient de correction des précips par entité en fonction de l'altitude SIM06

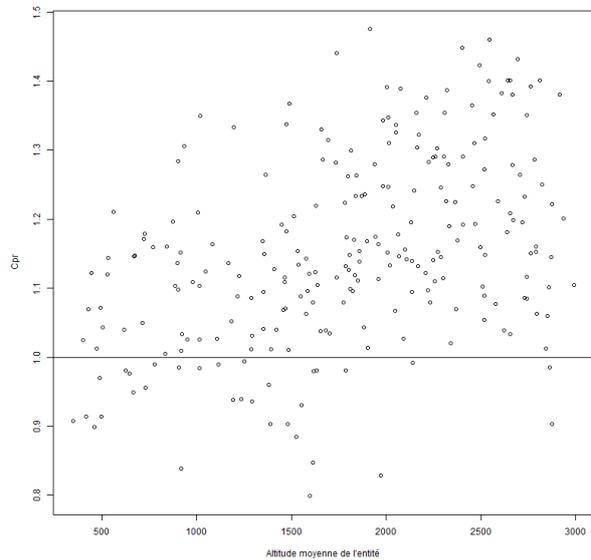


FIGURE 43 – Gauche : carte du correctif calculé C_{pr} par entité (sans unité). Droite : graphe en fonction de l'altitude moyenne de l'entité.

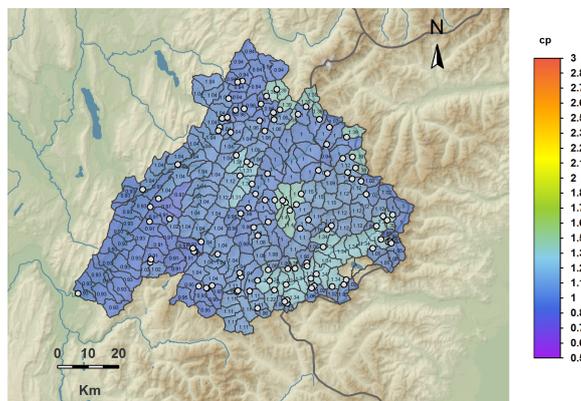


FIGURE 44 – Carte du correctif C_p par entité (sans unité) interne à MORDOR-TS.

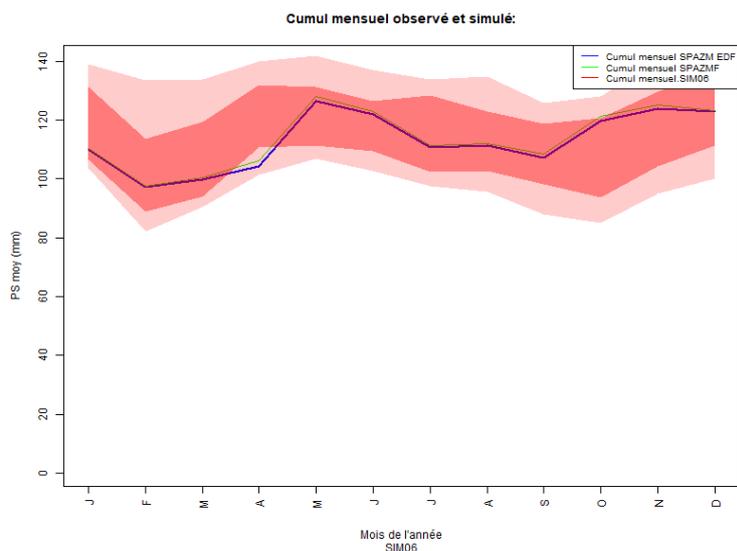


FIGURE 45 – Cumul mensuel interannuel pour SPAZM sur le bassin de l'Isère à Grenoble au km² (courbe bleue), SPAZM dégradé à 25 km² (courbe verte), et les minimum et maximum des cumuls mensuels interannuels de 100 simulations RAINSIM corrigées à 25 km² ainsi que les quantiles 10 et 90 associés (enveloppe rouge clair et rouge foncé).

5.6 Performances de la correction en hydrologie

Il ressort de la Figure 46 (gauche) que les performances en débit de RAINSIM corrigé sont bien supérieures à RAINSIM non corrigé (comparer à la Figure 42). Notons que cette amélioration est valable même si le bandeau de température SPAZM est rejoué, donc avec des températures indépendantes des simulations en précipitation (Figure 46, droite). Le choix du forçage en température est donc largement de 2ème ordre. Néanmoins la Figure 46 confirme que le forçage avec les températures analogues est légèrement meilleur que le bandeau SPAZM. Le KGE médian de 100 simulations passe de 0.92 à 0.95 et le régime de débit est plus centré sur l'observé et l'enveloppe entre le minimum et le maximum des 100 simulations semble plus resserré.

Aux points de contraintes (Figure 47), les simulations avec RAINSIM corrigé et les températures analogues semblent reproduire correctement le régime de débits de l'Isère aux différentes stations ainsi que celui de l'Arly. Pour l'Arc, le résultat semble moins convainquant avec un débit sous-estimé en hiver et surestimé pour les mois de juin, de juillet et d'août.

En conclusion, RAINSIM corrigé et utilisé en forçage du modèle hydrologique semble reproduire assez fidèlement les variations mensuelles en débit. Les résultats des simulations en débit journalier interannuel semblent également prometteurs. Le volume écoulé est sensiblement identique entre les simulations et les observations sur la plupart des postes. L'analyse de la capacité du modèle à générer de forts quantiles de débits n'a pas été étudié ici faute de temps mais elle donnerait un autre critère de qualité important dans la capacité de notre modèle à reproduire les crues décennales et centennales.

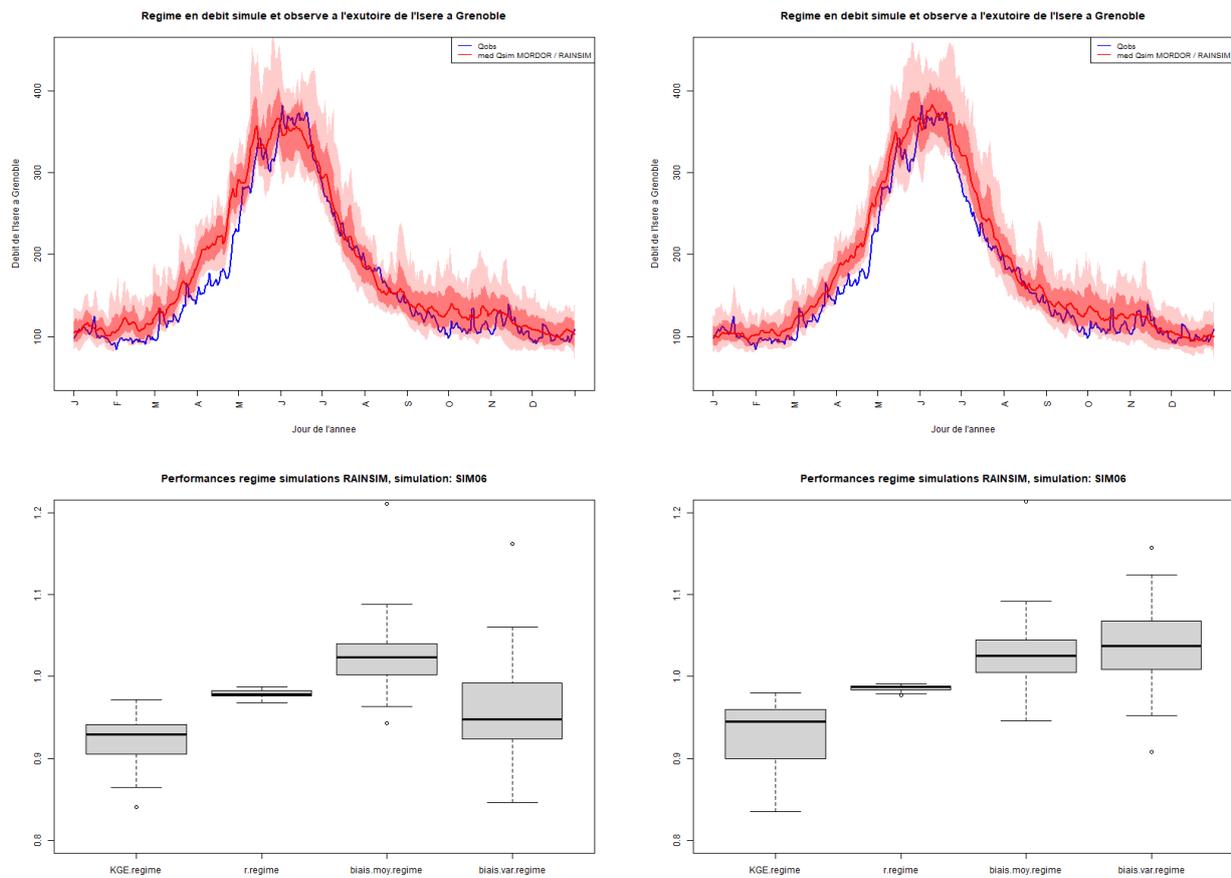


FIGURE 46 – Comparaison des performances en débit avec le bandeau de températures SPAZM (gauche) et analogues (droite).

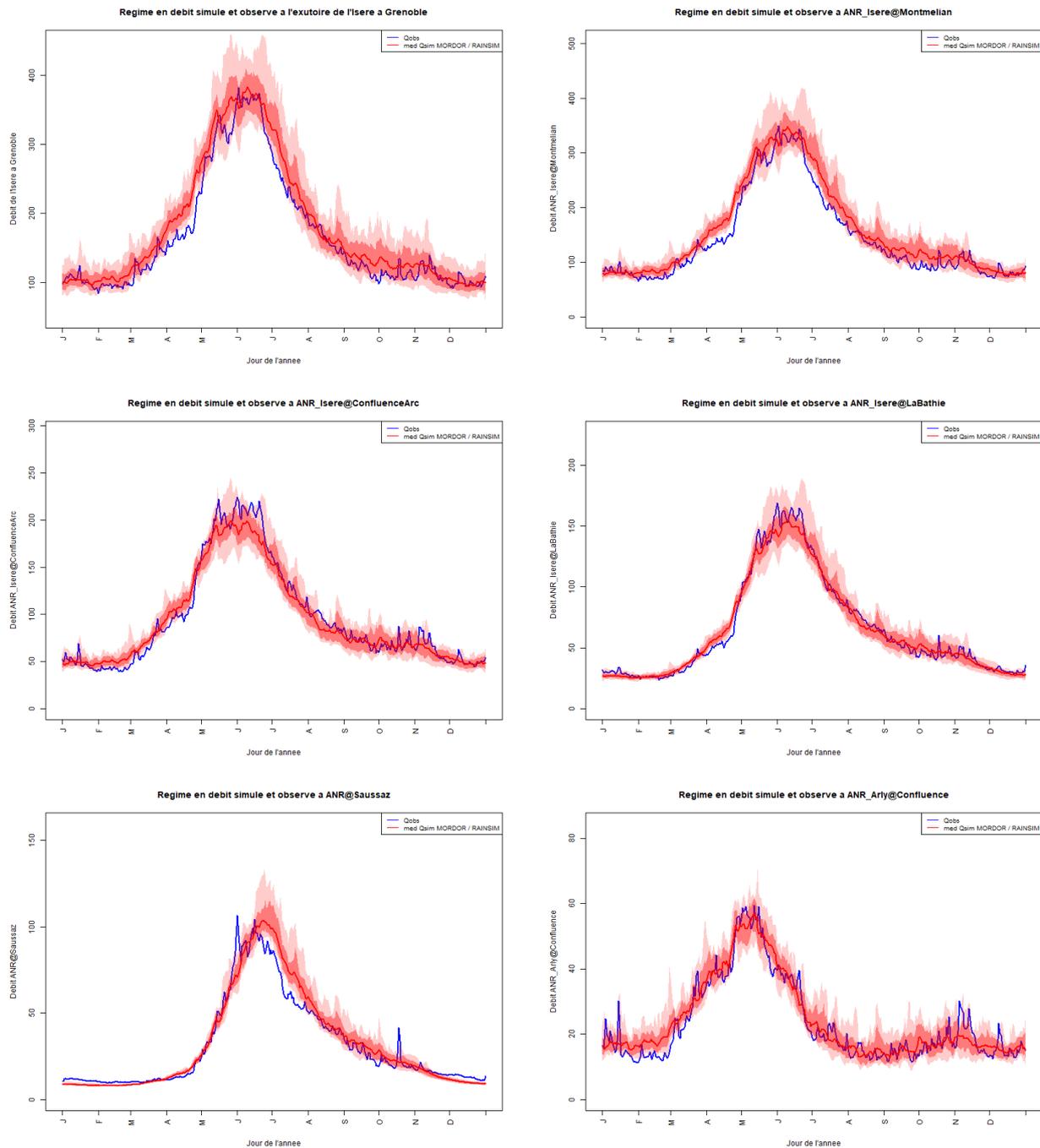


FIGURE 47 – Débit en 6 points de contrainte avec RAINSIM corrigé et le bandeau de températures analogues.

6 Étude de la concomitance torrent-torrent pour des périodes de retour non observées, à l'aide de RAINSIM

On utilise les 100 bandeaux de simulation RAINSIM sur 1985-2017 pour étudier les concomitances en pluie et en débit produit à l'échelle des entités, comme dans la Section 3.1.2. Il est à noter que nous avons grâce à RAINSIM 160 fois plus de données que dans la partie 3, c'est pourquoi nous pouvons regarder la concomitance pour des périodes de retour largement supérieures et non observées. Ainsi, nous considérons les excès au dessus du quantile 99 (3-4 excès par an), pour comparaison à la Section 3, mais également au dessus des quantiles 999 (un excès tous les 2-3 an) et 9999 (un excès tous les 25-30 ans).

La Figure 48 montre les graphes de concomitance associés à ces trois quantiles. Si nous comparons le graphe associé au quantile 99 avec la Figure 16 obtenue à partir des données SPAZM et COMEPHORE, nous remarquons que l'ellipse de concomitance en fort débit produit est moins étendue que celle des données SPAZM. Elle reste cependant orientée de la même manière, à savoir Nord-Est/Sud-Ouest. Les mêmes nuages de points pour des quantiles plus forts, à savoir 999 et 9999, montrent que les ellipses de concomitance en fort débit produit restent de même orientation mais diminuent en taille. Ainsi les événements les plus extrêmes se font de manière plus locale. Globalement, plus une crue sera violente, plus elle apparaîtra de manière locale. Pour les précipitations, des ellipses pour le quantile 99 sont plus étendues qu'avec SPAZM et COMEPHORE mais de même orientation. Comme pour le débit produit, les ellipses diminuent en taille lorsque les seuils augmentent.

La Figure 49 montre les cartes des ellipses de concomitances locales. La comparaison avec celles générées à partir des données SPAZM et COMEPHORE (cf. Figure 19), montre que la concomitance en fort débit produit est moins anisotrope avec RAINSIM. Nous retrouvons cependant toujours certaines tendances : les ellipses de concomitance sont souvent parallèles aux reliefs dans les grandes vallées et sont souvent plus étendues sur les premiers massifs susceptibles de bloquer les flux. Les ellipses de concomitance avec des quantiles plus élevés ont la même orientation mais diminuent en taille (les crues les plus extrêmes se font de manière plus locale).

Les carte de concomitance locale en précipitation de la Figure 50 montrent, comme avec SPAZM et COMEPHORE (Figure 19), des ellipses plus étendues qu'en débit produit, plus isotropes et plus homogènes au sein du bassin. Néanmoins on remarque, comme en Figure 48, que les ellipses associées au quantile 0.99 sont plus étendues avec RAINSIM qu'avec SPAZM et COMEPHORE. Ceci reste inexplicé et demanderait à être consolidé.

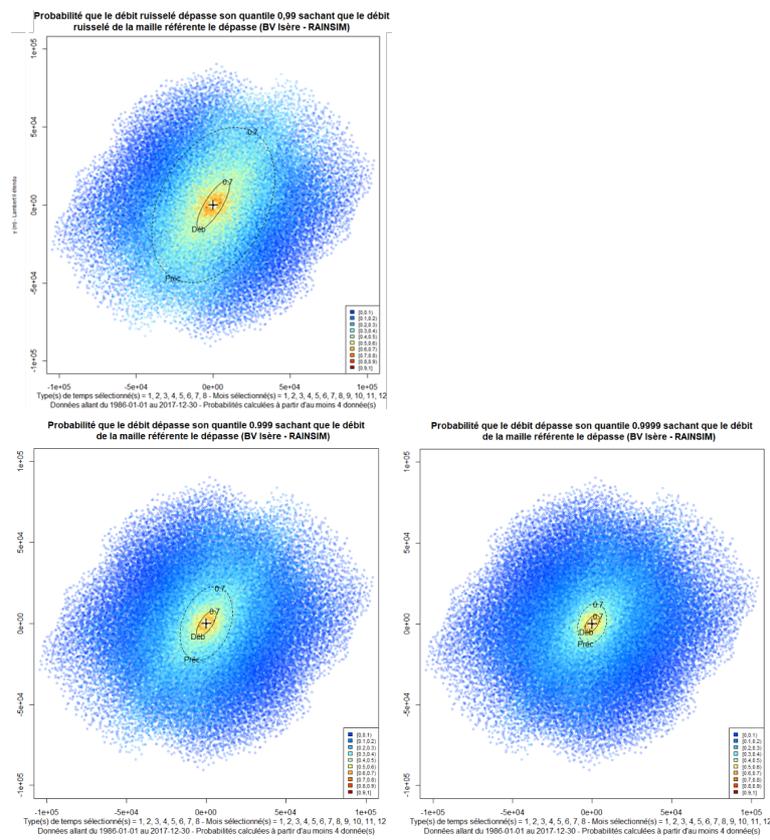


FIGURE 48 – Ellipses de concomitance en débit produit (traits pleins) et précipitation (pointillés) pour les excès du quantile 0.99 (haut), 0.999 (bas gauche) et 0.9999 (bas droit). Les points colorés montrent les probabilités bivariées de concomitance en débit produit pour chaque paire d'entité.

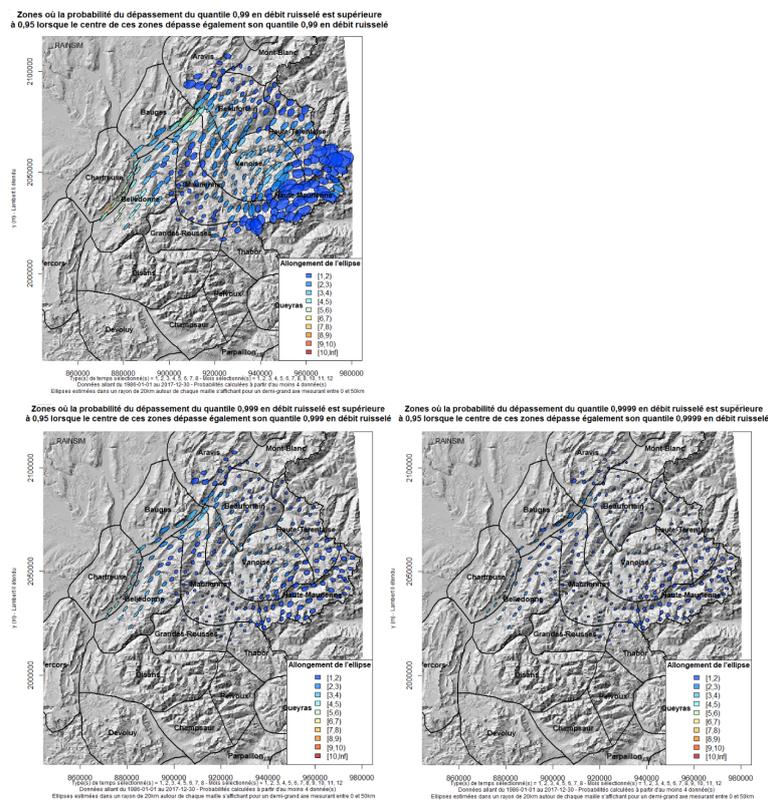


FIGURE 49 – Ellipses de concomitance locale en débit produit pour les excès du quantile 99 (haut), 999 (bas gauche) et 9999 (bas droit).

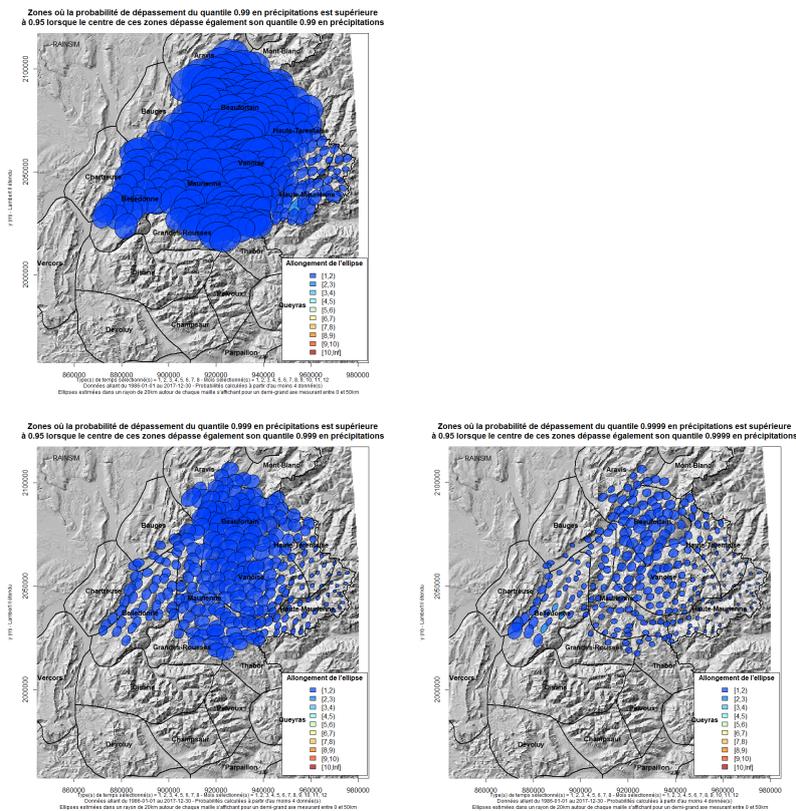


FIGURE 50 – Ellipses de concomitance locale en précipitation pour les excès du quantile 0.99 (haut), 0.999 (bas gauche) et 0.9999 (bas droit).

7 Conclusion

Dans une première partie, nous avons étudié la concomitance en débit ruisselé à l'échelle journalière au sein des bassins de l'Isère à Grenoble et du Drac à Fontaine, sur la période 1998-2017. Le modèle hydrologique spatialement distribué MORDOR-TS a été utilisé, avec la comparaison de deux forçages pluviométriques : SPAZM est une interpolation de pluviomètres, COMEPHORE est une ré-analyse radar. Néanmoins, MORDOR-TS ayant été calibré sur SPAZM, il s'est avéré indispensable de débiaiser COMEPHORE en volume annuel par rapport à SPAZM. Les résultats ont montré que les concomitances des forts débits produit se font préférentiellement parallèlement au relief : c'est flagrant au niveau de la Chartreuse et des Bauges ; c'est également le cas dans le Dévoluy et dans la Haute-Maurienne. Les fortes concomitances ont lieu surtout sur les premiers grands massifs susceptibles de bloquer les flux : dans les Bauges, dans la Chartreuse et dans le Vercors pour les flux d'Ouest, dans le Dévoluy pour les flux d'Ouest et de Sud, dans la Haute-Maurienne et à l'Est de la Haute-Tarentaise pour les flux d'Est. Les massifs intérieurs voient des concomitances bien plus faibles. On a également observé que les concomitances en débit produit se font principalement dans la direction Nord-Est/Sud-Ouest pour le bassin versant de l'Isère, et des orientations Nord-Ouest/Sud-Est pour le bassin versant du Drac. Néanmoins on a remarqué sur ces deux bassins de fortes disparités dans l'étendue des concomitances. On a également observé pour les fortes précipitations des concomitances beaucoup plus isotropes que pour les forts débits produits, beaucoup plus étendues et beaucoup plus homogènes spatialement au sein des bassins.

L'étude de la concomitance torrent-rivière nous a de plus permis de repérer les zones où les torrents réagissent fréquemment de manière concomitante aux rivières en hautes-eaux. Pour l'Isère, la variabilité géographique est importante et les torrents des massifs de Belledonne, de la Lauzière (Vanoise ouest) et de la Haute-Tarentaise - qui sont parmi les plus hauts massifs - sont les plus coordonnés à l'Isère à Grenoble le même jour (40 à 60% de jours coordonnés). Au contraire, il n'y a quasiment aucune coordination avec les torrents des vallées du Grésivaudan et de la plaine de l'Arc. On en a conclu que pour que l'Isère à Grenoble soit en hautes-eaux, il faut un système précipitant large échelle, c'est-à-dire touchant quasiment tout le bassin versant (de Belledonne à la Haute Tarentaise) et dans ce cas, ce sont surtout les massifs de haute altitude qui sont touchés. Pour le Drac, on a remarqué une plus grande homogénéité des probabilités conditionnelles. La plupart des entités ont au moins 20% de jours coordonnés avec le Drac en hautes-eaux, le Dévoluy et le sud de l'Oisans (Valjouffrey) semblant être le plus coordonnés au Drac à Fontaine en hautes-eaux. Pour la cas particulier de la région grenobloise, on a montré que :

- 30-40% des jours où l'Isère à Grenoble est en hautes-eaux, les torrents de Belledonne le sont aussi,
- 0-10% des jours où l'Isère à Grenoble est en hautes-eaux, les torrents des contreforts sud de la Chartreuse le sont aussi,
- 10-20% des jours où le Drac à Fontaine est en hautes-eaux, les torrents des contreforts est du Vercors le sont aussi.

Dans une deuxième partie, on a utilisé le générateur stochastique RAINSIM pour étudier les concomitances à des niveaux non observé sur le bassin de l'Isère. Néanmoins, MORDOR-TS ayant été calibré sur SPAZM et RAINSIM et SPAZM différant significativement en altitude, il s'est avéré de nouveau indispensable de débiaiser RAINSIM en volume annuel par rapport à SPAZM. L'étude de la concomitance en débit produit à partir de 330 années de simulation (en climat stationnaire) a révélé que RAINSIM avait tendance à faire des concomitances en fortes précipitations plus étendues que SPAZM, bien que de même direction préférentielle et répartition spatiale. Bizarrement, il en résulte une concomitance en débit moins étendue qu'avec SPAZM. En allant à des niveaux plus élevées, on

retrouve des concomitances de plus en plus locales, ce qui signifie que les crues les plus extrêmes sont aussi les plus locales (idem pour les précipitations).

Ces travaux ouvrent de nouvelles questions qu'il serait intéressant de creuser dans de futurs travaux, parmi lesquelles :

- qu'est-ce qui est responsable de la forte anisotropie des concomitances en débit produit alors que la concomitance en précipitation est quasi-isotrope ?
- quelle influence des différentes composantes précipitation/fonte/température sur les débits forts et leurs concomitance lorsqu'on va vers des valeurs de plus en plus extrêmes ?
- et à plus long terme : quelle influence du changement climatique sur les concomitances en débit et précipitation extrêmes ?

Références

- P. Ailliot, C. Thompson, and P. Thomson. Space–time modelling of precipitation by using a hidden Markov model and censored Gaussian distributions. *Journal of the Royal Statistical Society : Series C (Applied Statistics)*, 58(3) :405–426, 2009. ISSN 1467-9876. 10.1111/j.1467-9876.2008.00654.x. URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-9876.2008.00654.x>.
- I. Auer, R. Böhm, A. Jurkovic, W. Lipa, A. Orlik, R. Potzmann, W. Schöner, M. Ungersböck, C. Mattalla, K. Briffa, P. Jones, D. Efthymiadis, M. Brunetti, T. Nanni, M. Maugeri, L. Mercalli, O. Mestre, J.-M. Moisselin, M. Begert, G. Müller-Westermeier, V. Kveton, O. Bochnicek, P. Stastny, M. Lapin, S. Szalai, T. Szentimrey, T. Cegnar, M. Dolinar, M. Gajic-Capka, K. Zaninovic, Z. Majstorovic, and E. Nieplova. Histalp—historical instrumental climatological surface time series of the greater alpine region. *International Journal of Climatology*, 27(1) :17–46, 2007. 10.1002/joc.1377. URL <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.1377>.
- B. Bennett, M. Thyer, M. Leonard, M. Lambert, and B. Bates. A comprehensive and systematic evaluation framework for a parsimonious daily rainfall field model. *Journal of Hydrology*, 556 : 1123–1138, 2018. ISSN 0022-1694. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.043>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002216941630840X>.
- J. Blanchet, E. Paquet, P. Vaittinada Ayar, and D. Penot. Mapping rainfall hazard based on rain gauge data : an objective cross-validation framework for model selection. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(2) :829–849, 2019. 10.5194/hess-23-829-2019. URL <https://www.hydrolog-earth-syst-sci.net/23/829/2019/>.
- F. Garavaglia, J. Gailhard, E. Paquet, M. Lang, R. Garçon, and P. Bernardara. Introducing a rainfall compound distribution model based on weather patterns sub-sampling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(6) :951–964, 2010. 10.5194/hess-14-951-2010. URL <http://www.hydrolog-earth-syst-sci.net/14/951/2010/>.
- F. Garavaglia, M. Lang, E. Paquet, J. Gailhard, R. Garçon, and B. Renard. Reliability and robustness of rainfall compound distribution model based on weather pattern sub-sampling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2) :519–532, 2011. 10.5194/hess-15-519-2011. URL <http://www.hydrolog-earth-syst-sci.net/15/519/2011/>.
- F. Garavaglia, M. Le Lay, F. Gottardi, R. Garçon, J. Gailhard, E. Paquet, and T. Mathevet. 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, 2017. 10.5194/hess-21-3937-2017. URL <https://hess.copernicus.org/articles/21/3937/2017/>.
- F. Gottardi, C. Obled, J. Gailhard, and E. Paquet. Statistical reanalysis of precipitation fields based on ground network data and weather patterns : Application over French mountains. *Journal of Hydrology*, 432–433(0) :154 – 167, 2012. ISSN 0022-1694. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.014>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002216941200114X>.
- Magand, Claire, Ducharne, Agnès, Tilmant, François, Le Moine, Nicolas, Sauquet, Eric, Mathevet, Thibault, Vidal, Jean-Philippe, and Perrin, Charles. Hybridation de réanalyses météorologiques de surface pour les zones de montagne : exemple du produit duo sur le bassin de la durance. *La Houille Blanche*, (3) :77–85, 2018. 10.1051/lhb/2018035. URL <https://doi.org/10.1051/lhb/2018035>.
- J. Nash and J. Sutcliffe. River flow forecasting through conceptual models part i — a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3) :282–290, 1970. ISSN 0022-1694. <https://doi.org/>

10.1016/0022-1694(70)90255-6. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169470902556>.

- L. Rouhier. *Régionalisation d'un modèle hydrologique distribué pour la modélisation de bassins non jaugés . Application aux vallées de la Loire et de la Durance*. PhD thesis, Sorbonne Université École doctorale Géosciences, Ressources Naturelles et Environnement, 2018.
- L. Rouhier, M. Le Lay, F. Garavaglia, N. Le Moine, F. Hendrickx, C. Monteil, and P. Ribstein. Impact of mesoscale spatial variability of climatic inputs and parameters on the hydrological response. *Journal of Hydrology*, 553 :13 – 25, 2017. ISSN 0022-1694. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.037>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169417305012>.
- P. Vaithinada Ayar, J. Blanchet, E. Paquet, and D. Penot. Space-time simulation of precipitation based on weather pattern sub-sampling and meta-gaussian model. *Journal of Hydrology*, 581 : 124451, 2020. ISSN 0022-1694. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124451>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169419311862>.



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>