

## SIMULATION DE DÉBITS ET D'ÉVÈNEMENTS DE CRUE À PARTIR D'INFORMATIONS ATMOSPHÉRIQUES DE GRANDE ÉCHELLE : EXEMPLE DU BASSIN VERSANT DU RHÔNE AMONT (ALPES EUROPÉENNES)

**Caroline LEGRAND, Bruno WILHELM, Benoît HINGRAY**

*Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, G-INP, IGE, 38000 Grenoble, France*

*caroline.legrand@univ-grenoble-alpes.fr*

**Résumé :** Dans cette étude, nous évaluons la capacité de deux chaînes de modélisation à reproduire les variations de l'activité de crue du Rhône amont (10900 km<sup>2</sup> ; Alpes Européennes) sur le dernier siècle (1902-2009). Les chaînes de modélisation sont composées de (i) la réanalyse atmosphérique ERA-20C, (ii) soit du modèle de descente d'échelle statistique SCAMP, soit du modèle de descente d'échelle dynamique MAR, et (iii) du modèle glacio-hydrologique GSM-SOCONT. Les températures et les précipitations de bassin ainsi que les variations de l'activité de crue simulées et observées sont comparées. Les meilleurs résultats sont obtenus à partir du modèle de descente d'échelle statistique SCAMP en raison de biais importants présents dans les simulations MAR. Nous envisageons de réaliser une correction de type quantile-quantile de ces biais.

**Mots-Clés :** activité de crue ; modélisation hydro-météorologique ; descente d'échelle dynamique ; descente d'échelle statistique

**Abstract:** In this study, we evaluate the capacity of two simulation chains to reproduce changes in flood activity of the upper Rhône River (10900 km<sup>2</sup>, European Alps) over the last century (1902-2009). The modeling chains are made up of (i) the atmospheric reanalysis ERA-20C, (ii) either the statistical downscaling model SCAMP, or the dynamical downscaling model MAR, and (iii) the glacio-hydrological model GSM-SOCONT. The mean areal precipitation and temperature, as well as the simulated and observed flood activity are compared. The best results are obtained from the statistical downscaling model SCAMP due to large bias in MAR simulations. We intend to proceed with a quantile-quantile bias correction.

**Keywords:** flood activity; hydro-meteorological modeling; dynamical downscaling; statistical downscaling

### Introduction

Les crues font partie des catastrophes naturelles les plus destructrices en termes de pertes humaines, matérielles et économiques. Ce risque pourrait s'amplifier avec le changement climatique en cours, qui modifiera probablement l'intensité et la fréquence des crues. Estimer comment l'activité de crue (périodes riches et pauvres en crue) changera dans le futur n'est cependant pas aisé. L'approche classiquement utilisée consiste à estimer les variations de l'activité de crue à partir de simulations hydrologiques forcées par des scénarios météorologiques pour différents scénarios climatiques futurs. Le développement de scénarios météorologiques pertinents est par conséquent déterminant. Comme les modèles climatiques possèdent une résolution grossière et supérieure aux échelles pour lesquelles les processus hydrologiques ont lieu, des modèles de descente d'échelle, soit dynamiques, soit statistiques, sont également utilisés.

Dans cette étude, nous avons pour but d'évaluer la capacité de deux chaînes de modélisation à reproduire les variations de l'activité de crue du Rhône amont (10900 km<sup>2</sup> ; Alpes Européenne) sur le

dernier siècle (1902-2009). Les chaînes de modélisation sont composées de (i) la réanalyse atmosphérique ERA-20C (Poli et al., 2016), (ii) soit du modèle de descente d'échelle statistique SCAMP (Sequential Constructive Atmospheric Analogues for Multivariate weather Predictions; Raynaud et al., 2020), soit du modèle de descente d'échelle dynamique MAR (Modèle Atmosphérique Régional ; Ménégoz et al., 2020), et (iii) du modèle glacio-hydrologique GSM-SOCONT (Glacier and Snowmelt SOil CONTRIBUTion model; Schaeffli et al., 2005).

## 1. Zone d'étude

La zone d'étude retenue est le bassin versant du Rhône amont (10900 km<sup>2</sup> ; Fig. 1) en raison de la constante augmentation de l'exposition des biens et des personnes aux risques hydrologiques en lien avec la croissance démographique et l'attractivité touristique. Ce bassin couvre une partie des Alpes françaises et suisses et le climat y est principalement de type continental. A basses altitudes, les précipitations moyennes annuelles s'étendent de 600 mm dans le canton du Valais, en Suisse, à 1100 mm à Chamonix en France. A l'exutoire du bassin versant, la station hydrométrique de Bognes enregistre les débits moyens journaliers. Cette station se situe à Injoux-Génissiat, en France, à 46 km à l'aval de la confluence entre le Rhône et l'Arve et à 6 km à l'aval de la confluence entre le Rhône et la Valserine. Le régime hydrologique du Rhône à Bognes est de type nivo-glaciaire avec des débits mensuels moyens minimum et maximum ayant lieu respectivement en Décembre (environ 270 m<sup>3</sup>/s) et Juillet (environ 530 m<sup>3</sup>/s) pour un débit moyen annuel d'environ 358 m<sup>3</sup>/s.

A partir des années 1950-1960, une grande partie du Rhône a été aménagée, notamment dans le canton du Valais, en Suisse, pour la production hydro-électrique, la satisfaction des besoins en eau pour l'agriculture et la protection contre les inondations. Le régime hydrologique du Rhône amont a ainsi été modifié par la construction, à cette époque, des barrages de Mattmark, Grande-Dixence, Mauvoisin et Emosson, pour ne citer que les plus importants, qui stockent une partie des apports intervenant au printemps et en été lors de la fonte des neiges et des glaciers. Le niveau du Léman est aussi régulé depuis 1884 pour protéger les riverains contre les inondations.

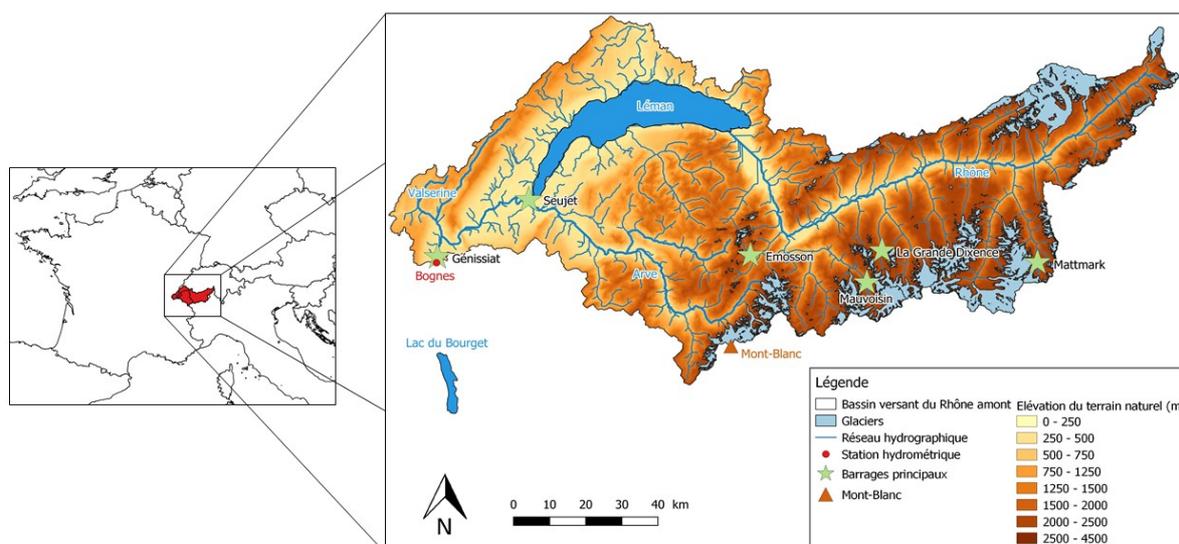


figure 1 : Zone d'étude

## 2. Stratégie de calage du modèle hydrologique

La simulation des débits est réalisée à partir du modèle glacio-hydrologique GSM-SOCONT (Glacier and Snowmelt SOil CONTriBution model; Schaefli et al., 2005), un modèle spécialement conçu pour la simulation hydrologique en zone de montagne. Il s'agit d'un modèle conceptuel à réservoirs et semi-distribué. Le bassin versant est divisé en 18 sous-bassins, chaque sous-bassin est divisé en partie glaciaire et en partie non-glaciaire et chacune de ces entités est subdivisée en bandes d'altitudes de 500 m de hauteur. Les mêmes paramètres s'appliquent à toutes les bandes d'altitudes d'un même sous-bassin. Les paramètres peuvent varier d'un sous-bassin à un autre. Le modèle hydrologique permet de simuler la fraction des précipitations qui tombe sous forme liquide et solide, la dynamique d'accumulation et de fonte du manteau neigeux, les processus d'évapotranspiration, d'infiltration des précipitations ou de la fonte, les processus de transfert des ruissellements, le stockage et le déstockage des précipitations infiltrées dans les nappes, ainsi que la propagation des débits dans le réseau hydrographique. Pour les parties englacées des bassins versants, il permet aussi de simuler les débits de fonte en provenance des glaciers. Les principaux forçages météorologiques utilisés pour une simulation sont, pour chaque unité de discrétisation de chaque bassin versant, les précipitations journalières et les températures moyennes journalières.

L'anthropisation du bassin versant à partir des années 1950-1960 rend difficile le calage des paramètres du modèle hydrologique puisque nous ne disposons, comme observations, que de données météorologiques et hydrométriques sur une période où le régime hydrologique est significativement perturbé par les grands barrages hydro-électriques. Nous proposons une modélisation du fonctionnement « naturel » du bassin versant sur le dernier siècle à partir d'un calage climatique visant à reproduire certaines signatures hydrologiques des bassins modélisés (Hingray et al., 2010 ; Horner, 2020). Ces signatures sont le régime journalier interannuel et la distribution annuelle des débits maximum journaliers classés puisque nous nous intéressons aux événements de crue. Nous faisons ainsi l'hypothèse que le comportement hydrologique « naturel » des sous-bassins a peu changé au cours du dernier siècle.

Du fait de ses dimensions et indépendamment de sa régulation actuelle, le Léman a une influence significative sur le bilan hydrologique et sur la dynamique des débits du Rhône. Même en l'absence de régulation, le lac a pour effet de laminier les apports et les crues en provenance du bassin supérieur du Rhône. L'impact du Léman sur l'hydrologie du Rhône s'est accru avec la mise en place de sa régulation. Notamment, le règlement sur la manœuvre de l'ouvrage de régularisation du niveau du Léman à Genève du 17 Septembre 1997 fixe i) le niveau du lac à viser pour chaque jour d'une année civile donnée (ce niveau varie donc au cours de l'année), ii) la valeur minimum du débit à assurer en tout temps à l'aval (débit réservé) et iii) la valeur maximum du débit à ne pas dépasser sauf durant des périodes de hautes eaux du lac. Les débits en sortie du Léman sont également déterminés par les débits à turbiner par la centrale hydroélectrique située en sortie du Léman, ces débits étant eux-mêmes déterminés par la demande électrique régionale.

La chronologie passée de la demande électrique et, par suite, celle des débits à turbiner n'étant pas disponibles, il n'est pas possible de proposer une modélisation fine de la régulation du Léman. Seuls le fonctionnement hydrologique classique du Léman résultant de son fonctionnement « naturel » (laminage des apports associés aux phénomènes de stockage et de déstockage d'un réservoir hydraulique non régulé) et les contraintes liées au règlement cité ci-dessus ont été prises en considération pour simuler les débits en sortie du Léman. Cette modélisation n'a évidemment pas pour ambition de permettre la simulation des débits observés sur les décennies passées à l'aval du Léman. A ce titre, la comparaison des observations et des simulations à l'aval du Léman ne peut être considérée que pour information. Nous considérons cependant que la modélisation proposée pourra permettre de simuler le comportement hydrologique « naturel » du système pour des contextes climatiques différents du contexte actuel, ce qui est l'objectif à plus long terme de ce travail (simulation de l'hydrologie du bassin pour les climats du millénaire passé).

Dans ce contexte, le fonctionnement du Léman qui serait obtenu sans régulation est simplement simulé à l'aide du système classique de 3 équations nécessaires pour simuler le comportement des réservoirs non régulés : (i) l'équation de bilan, (ii) l'équation de stockage et (iii) l'équation de débit du réservoir (Hingray et al., 2009). L'équation de bilan relie les variations de stock au sein du réservoir aux apports (débits des bassins versants amont et latéraux) et aux pertes (évaporation, débit en sortie du Léman), l'équation de stockage relie le volume stocké à la hauteur d'eau dans le réservoir et l'équation de débit relie le débit de sortie à la hauteur dans le réservoir. Dans notre modélisation, le débit en sortie du Léman sans régulation est supposé proportionnel au volume stocké dans le réservoir (la constante de temps K du réservoir est le seul paramètre du modèle ; elle définit en première approximation le décalage entre les crues entrantes et les crues sortantes du Léman). Pour les simulations présentées plus loin, le modèle de comportement ci-dessus est suivi des règles de régulation définies dans le règlement mentionné précédemment.

### **3. Descente d'échelle dynamique**

Nous utilisons le modèle de descente d'échelle dynamique MAR (Modèle Atmosphérique Régional ; Ménégot et al., 2020), ce modèle ayant déjà été testé et validé avec les sorties de la réanalyse ERA-20C comme conditions aux limites pour l'Europe (Wyard et al., 2017, 2018). Dans notre étude, MAR est forcé par les sorties de la réanalyse ERA-20C au pas de temps 6h, possède une résolution horizontale de 7 km, 24 niveaux pour l'atmosphère, 7 niveaux pour le sol et la couverture neigeuse est décrite par un nombre de couches variant de 1 à 20.

ERA-20C est une réanalyse atmosphérique couvrant la période 1900-2010 et ayant une résolution spatiale de  $1,125^\circ$  (environ 125 km). ERA-20C assimile des données de pression de surface et de vent à la surface de l'océan et est forcé par des données de température de surface de la mer, de couverture de glace de mer, de composition atmosphérique et de forçage solaire (Poli et al., 2016). La résolution grossière de ERA-20C ne permet pas une description correcte des variables atmosphériques en zone de montagne, ce qui justifie l'utilisation d'un modèle régional ayant une plus grande résolution et des paramétrisations physiques avancées.

### **4. Descente d'échelle statistique**

Indépendamment du modèle MAR, nous utilisons le modèle SCAMP (Sequential Constructive Atmospheric Analogues for Multivariate weather Predictions; Raynaud et al., 2020), un modèle de descente d'échelle statistique, afin de générer des scénarios météorologiques sur le dernier siècle à partir des sorties de la réanalyse ERA-20C. Le modèle SCAMP comprend :

(1) Un modèle analogue classique (Obled, 2002; Bontron, 2004; Mezghani and Hingray, 2009; Ben Daoud, 2010; Marty, 2012; Chardon, 2014; Raynaud, 2016) basé sur l'hypothèse que deux situations atmosphériques similaires donnent lieu à des situations météorologiques locales similaires (Lorenz, 1969). Nous reprenons les caractéristiques du calage (fenêtres d'analogie, prédicteurs, critères d'analogie) du modèle analogue optimisé par Raynaud et al. (2020) pour un bassin en Suisse, le bassin versant de l'Aar. Pour chaque jour de la période de simulation, 30 valeurs de pluie de bassin et de température moyenne de bassin observées et rééchantillonnées sont ainsi obtenues.

(2) Un module permettant de générer des pluies de bassin supérieures à celles observées afin d'améliorer la reproduction des cumuls sur 3 ou 5 jours. Pour chaque jour de la période de simulation, une loi Gamma (Chardon et al., 2018; Raynaud et al., 2020) est ajustée aux 30 valeurs de pluie de bassin issues des analogues et un nouvel échantillon de 30 valeurs de pluie de bassin est tiré aléatoirement.

(3) Un module de réarrangement temporel des dates analogues afin d'améliorer la consistance temporelle entre deux jours consécutifs et ainsi favoriser la succession de jours pluvieux. Ce module

correspond à la méthode du Schaake Shuffle initialement introduit par Clark et al. (2004). 30 scénarios de dates analogues, de pluie de bassin et de température moyenne de bassin sont ainsi obtenus.

(4) Un module de désagrégation spatiale pour les précipitations (Chardon et al., 2018; Raynaud et al., 2020) permettant de passer de l'échelle du bassin versant aux stations pluviométriques tout en assurant une cohérence spatiale, la structure spatiale retenue étant celle d'un analogue.

(5) Un module de correction de température inspiré de la méthode ANATEM (ANALogues + TEMoin ; Kuentz et al., 2015) appliqué aux scénarios de température de bassin obtenus à l'issue du Schaake Shuffle. La température de la réanalyse ERA-20C corrigée par une méthode de débiaisage de type quantile-quantile est choisie comme chronique témoin.

## 5. Critères d'évaluation des chaînes de modélisation

Afin d'évaluer la performance de chaque chaîne de modélisation, plusieurs variables hydro-météorologiques sont analysées.

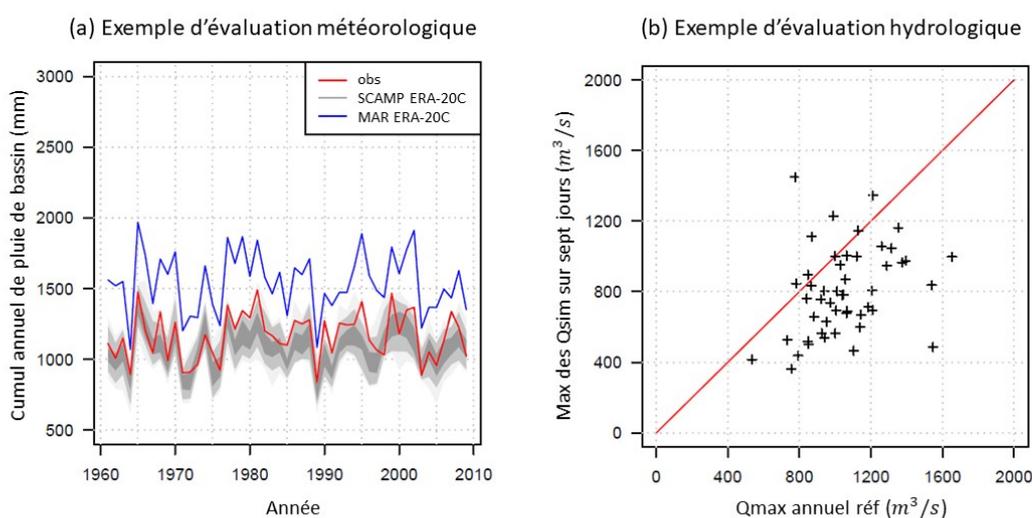
(1) Evaluation météorologique : les chroniques annuelles et les régimes mensuels interannuels des pluies et des températures moyennes de bassin simulés et observés sont comparés sur la période 1961-2009.

(2) Evaluation hydrologique : les débits simulés sont comparés (i) à des débits de référence (i.e. les débits simulés à partir de la météorologie observée) sur la période 1961-2009 puisque, pour cette période, les débits observés sont influencés par les grands barrages hydro-électriques et sont donc non utilisables pour notre évaluation, et (ii) aux débits observés sur la période antérieure à 1950.

Plus précisément, l'évaluation hydrologique concerne (i) les débits maximum annuels en chronologie, i.e. si un débit maximum annuel est observé le jour J, le maximum des débits annuels simulés des jours J-3 à J+3 est sélectionné (tolérance de +/- 3 jours), et (ii) les variations de l'activité de crue, celles-ci étant obtenues à partir des chroniques de débit et de l'approche POT (Peak Over Threshold).

## 6. Premiers résultats et perspectives

Les premiers résultats montrent que la météorologie et les événements de crue sont mieux reproduits par la chaîne de modélisation comprenant le modèle de descente d'échelle statistique SCAMP. Cela est dû au fait que les simulations MAR présentent des biais importants : (i) une surestimation des pluies de bassin (Fig. 2a) et (ii) une sous-estimation des températures moyennes de bassin au printemps, conduisant à une sous-estimation des événements de crue en chronologie (Fig. 2b).



**figure 2 :** (a) Chroniques des cumuls annuels de pluie de bassin sur la période 1961-2009 observées (en rouge), simulées par MAR ERA-20C (en bleu) et simulées par SCAMP ERA-20C (en gris). Les différents niveaux de gris représentent les intervalles de confiance à 50%, 90% et 99% des 30 scénarios issus de SCAMP ERA-20C. (b) Nuage de points des débits maximum annuels de référence et simulés par MAR ERA-20C en chronologie sur la période 1961-2009.

La bonne reproduction des températures est cruciale pour notre bassin puisqu'elle affecte (i) la répartition des précipitations en pluie (si  $T > 2^{\circ}\text{C}$ ) ou en neige (si  $T < 0^{\circ}\text{C}$ ) et (ii) l'accumulation et la fonte saisonnière du manteau neigeux. Plus précisément, les fontes du glacier et du manteaux neigeux sont modélisées par des modèles de type degré-jour (si  $T > 0^{\circ}\text{C}$ ) dans le modèle hydrologique.

Les résultats obtenus sont en adéquation avec ceux trouvés dans la littérature, à savoir que les modèles de régionalisation présentent des biais importants dans les précipitations et les températures (Ayar et al., 2015; Troin et al., 2015; Tang et al., 2016). D'autres études comme celle de Boé et al. (2007) montrent également que la correction de ces biais peut considérablement améliorer la qualité des simulations hydrologiques. Nous envisageons donc de réaliser un débiaisage de type quantile-quantile des précipitations et des températures moyennes issues de MAR.

## Bibliographie

Ayar P. V., Vrac M., Bastin S., Carreau J., Déqué M., and Gallardo C., 2016: Intercomparison of statistical and dynamical downscaling models under the EURO- and MED-CORDEX initiative framework: Present climate evaluations. *Climate Dynamics*, **46**, 1301-1329.

Ben Daoud A., 2010 : *Améliorations et développements d'une méthode de prévision probabiliste des pluies par analogie : application à la prévision hydrologique sur les grands bassins pluviaux de la Saône et de la Seine*. Thèse de doctorat. Université de Grenoble.

Boé J., Terray L., Habets F., and Martin E., 2007: Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. *International Journal of Climatology*, **27**, 1643-1655.

Bontron G., 2004 : *Prévision quantitative des précipitations : adaptation probabiliste par recherche d'analogues*. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble.

Chardon J., Hingray B., Favre A.-C., Autin P., Gailhard J., Obled C., and Zin I., 2014: Spatial similarity and transferability of analog dates for precipitation downscaling over France. *Journal of Climate*, **27**, 5056-5074.

Chardon J., Hingray B., and Favre A.-C., 2018: An adaptive two-stage analog/regression model for probabilistic prediction of small-scale precipitation in France. *Hydrology and Earth System Sciences*, **22**, 265-286.

- Clark M., Gangopadhyay S., Hay L., Rajagopalan B., and Wilby R., 2004: The Schaake shuffle: A method for reconstructing space-time variability in forecasted precipitation and temperature fields. *Journal of Hydrometeorology*, **5**, 243-262.
- Hingray B., Picouet C., Musy A., 2009 : *Hydrologie 2 Une science pour l'ingénieur*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 601 pages.
- Hingray B., Schaefli B., Mezghani A., and Hamdi Y., 2010: Signature-based model calibration for hydrological prediction in mesoscale Alpine catchments. *Hydrological Sciences Journal*, **55(6)**, 1002-1016.
- Horner I., 2020 : *Construction et évaluation de signatures hydrologiques pour le diagnostic et l'amélioration d'un modèle hydrologique distribué*. Thèse de doctorat. Université Grenoble Alpes.
- Kuentz A., Mathevet T., Gailhard J., and Hingray B., 2015: Building long-term and high spatio-temporal resolution precipitation and air temperature reanalyses by mixing local observations and global atmospheric reanalyses: the ANATEM method. *Hydrology and Earth System Sciences*, **19**, 2717-2736.
- Lorenz E. N., 1969: Atmospheric predictability as revealed naturally occurring analogues. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **26(4)**, 636-646.
- Marty R., Zin I., Obled C., Bontron G., and Djerboua A., 2012: Toward real-time daily PQPF by an analog sorting approach: Application to flash-flood catchments. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **51**, 505-520.
- Ménégoz M., Valla E., Jourdain N. C., Blanchet J., Beaumet J., Wilhelm B., Gallée H., Fettweis X., Morin S., and Anquetin S., 2020: Contrasting seasonal changes in total and intense precipitation in the European Alps from 1903 to 2010. *Hydrology and Earth System Sciences*, **24(11)**, 5355-5377.
- Mezghani A. and Hingray B., 2009: A combined downscaling-disaggregation weather generator for stochastic generation of multisite hourly weather variables over complex terrain: development and multi-scale validation for the Upper Rhone River basin. *Journal of Hydrology*, **377(3-4)**, 245-260.
- Obled C., Bontron G., and Garçon R., 2002: Quantitative precipitation forecasts: A statistical adaptation of model outputs through an analogues sorting approach. *Atmospheric Research*, **63(3)**, 303-324.
- Poli P., Hersbach H., Dee D. P., Berrisford P., Simmons A. J., Vitart F., Laloyaux P., Tan D. G. H., Peubey C., Thépaut J.-N., Trémolet Y., Hólm E. V., Bonavita M., Isaksen L., and Fisher M., 2016: ERA-20C: An Atmospheric Reanalysis of the Twentieth Century. *Journal of Climate*, **29**, 4083-4097.
- Raynaud D., Hingray B., Zin I., Anquetin S., Debionne S., and Vautard R., 2016: Atmospheric analogs for physically consistent scenarios of surface weather in Europe and Maghreb. *International Journal of Climatology*, **37(4)**, 2160-2176.
- Raynaud D., Hingray B., Evin G., Favre A.-C., and Chardon J., 2020: Assessment of meteorological extremes using a synoptic weather generator and a downscaling model based on analogues. *Hydrology and Earth System Sciences*, **24**, 4339-4352.
- Schaefli B., Hingray B., Niggli M., and Musy A., 2005: A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, **9**, 95-109.
- Tang J., Niu X., Wang S., Gao H., Wang X., and Wu J., 2016: Statistical downscaling and dynamical downscaling of regional climate in China: Present climate evaluations and future climate projections. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, **121(5)**, 2110-2129.
- Troin M., Caya D., Velázquez J. A., and Brissette F., 2015: Hydrological response to dynamical downscaling of climate model outputs: A case study for western and eastern snowmelt-dominated Canada catchments. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, **4**, 595-610.
- Wyard C., Scholzen C., Fettweis X., Van Campenhout J., and François L., 2017: Decrease in climatic conditions favouring floods in the south-east of Belgium over 1959-2010 using the regional climate model MAR. *International Journal of Climatology*, **37**, 2782-2796.

Wyard C., Doutreloup S., Belleflamme A., Wild M., and Fettweis X., 2018: Global Radiative Flux and Cloudiness Variability for the Period 1959-2010 in Belgium: A Comparison between Reanalyses and the Regional Climate Model MAR. *Atmosphere*, **9**, 262.