

Évolution récente et future de la ressource en eau dans les Alpes. Résultats d'une modélisation hydrologique spatialisée sur le bassin de l'Isère à Grenoble

Recent and future changes in water resources in the Alps. Results of a spatially distributed hydrological model on the Isere catchment

Matthieu Le Lay^{1*}, Agnès Brenot¹, Joël Gailhard¹, et Pierre Bernard¹

¹ EDF-DTG, Saint-Martin-le-Vinoux, France

Résumé. Comment évoluent les ressources en eau dans les Alpes sous l'effet du changement climatique ? Diminution de l'enneigement, fonte des glaciers, étiages plus sévères : autant de questions aujourd'hui cruciales pour l'ensemble des usages de l'eau dans ces régions, parmi lesquels la production hydro-électrique. Y répondre suppose à la fois de savoir modéliser finement le fonctionnement de ces hydro-systèmes et de savoir quantifier l'évolution du climat à ces échelles. Une nouvelle version spatialement distribuée du modèle hydrologique MORDOR d'EDF [1] a été déployée sur l'ensemble du bassin versant de l'Isère à Grenoble, en valorisant l'ensemble des données hydro-nivologiques disponibles sur ce bassin (mesures de débit, d'enneigement, images satellites de surfaces enneigées, bilans glaciaires...). Elle a pour objectif de répondre aux nombreux enjeux que pose l'exploitation hydro-électrique de la vallée, en simulant la réponse hydrologique en tout point du bassin et dans différents contextes climatiques. Forcée par des scénarios climatiques préalablement dé-biaisés et régionalisés, elle permet de simuler l'évolution des débits en rivière, les changements de régimes saisonniers, ou encore l'évolution des contributions glaciaires. Autant de données d'entrée précieuses pour quantifier finement les changements déjà observés et adapter au mieux la gestion et l'exploitation des aménagements de la vallée.

Abstract. What will be the impact of the climate change on the water resources in the Alps area? Snow cover decreasing, glacier melting and severely lower level discharges are the main concern expected in this area for all water use, including hydroelectric generation. Answering to that

* Corresponding author: matthieu.le-lay@edf.fr

question, imply to know how to model in details the functioning of hydrological systems and to know how to quantify climate change at these spatial scales. A new version, totally spatialized, of the EDF hydrological model MORDOR [1] was built to model the hydrology of the whole drainage basin of the Isere river at Grenoble. This hydrological model take into account all the data available on the basin (water discharge measurements, snow cover estimations through measurements and satellite observations, glacier mass balance...). The main scope of this hydrological model is to provide information about the hydroelectric generation exploitation of the Isere river basin through hydrological simulations for different sitting and for different climatic context. Inputs of the climatic scenarios, corrected and regionalized beforehand, enable to simulate river discharges and hydrological regime changes and to evaluate the trend expected for glacier melt contribution. All these results are of major interest to closely quantify the changes already observed with climate change and to get prepared for a better management and exploitation of hydroelectric generation on the Isère river basin.

1 Introduction

Dans le contexte de changement climatique actuel, les questions liées à la ressource en eau prennent une importance nouvelle. Il est désormais nécessaire, quel que soit le contexte hydro-climatique considéré, de s'intéresser non plus seulement à la caractérisation de la ressource mais également à son devenir. Dans les Alpes, « château d'eau » de l'Europe, l'augmentation rapide des températures observée depuis les années 80 a déjà considérablement modifié le cycle hydrologique, en réduisant la part nivale des précipitations, en accélérant la fonte printanière du manteau neigeux, mais également en provoquant une fonte sans précédent des glaciers.

Face à ces évolutions, qui vont s'accélérer dans les décennies futures, les usages traditionnels de l'eau (tourisme, agriculture, hydro-électricité) sont questionnés. Électricité de France (EDF), en tant que 1^{er} producteur hydro-électrique français, est par nature fortement exposé aux conditions climatiques et à leur évolution. L'entreprise développe ainsi depuis une vingtaine d'année une démarche d'adaptation au changement climatique. Cette résilience climatique doit s'obtenir à la fois par une adaptation de son parc de production existant mais également par la prise en compte des hypothèses d'évolution du climat dans la conception de nouvelles installations.

Ce travail illustre la construction d'une vision prospective de l'hydrologie sur le bassin versant de l'Isère en amont de Grenoble. Il s'appuie sur la construction d'une modélisation fine du bassin, à partir du modèle spatialisé MORDOR-TS développé à EDF [1]. Cette modélisation valorise l'ensemble des données hydro-nivologiques disponibles sur le bassin (mesures de débit, d'enneigement, images satellites de surfaces enneigées, bilans glaciaires...) pour simuler la réponse hydrologique en tout point du bassin et dans différents contextes climatiques.

Dans la première partie de l'article, nous décrivons à la fois la zone d'étude, les données disponibles, la modélisation du bassin et la construction des scénarios climatiques. La seconde partie est consacrée à l'évaluation du modèle hydrologique. Dans la troisième partie, et fort de cette modélisation, nous illustrons la variabilité hydro-climatique passée et définissons un aléa hydrologique propre au climat actuel. Enfin, dans la quatrième et dernière

partie, nous proposons des scénarios d'évolution hydrologique pour les prochaines décennies. Les changements de régimes saisonniers, ou encore l'évolution des contributions glaciaires, sont analysés.

2 Données et méthodes

2.1 Le Bassin versant de l'Isère à Grenoble

L'Isère à Grenoble draine un bassin versant de près de 5700 km² (Fig. 1), très contrasté en termes d'altitude : entre 3800 m et 200 m, avec une altitude médiane de 1760 m. Près de 2 % de la surface du bassin est aujourd'hui occupée par des glaciers [2]. L'hydrologie de ce bassin est largement influencée par les ouvrages hydro-électriques (Tignes, Mont Cenis, Bissorte et Roselend pour ne citer que les principaux). Les principaux effets de cette exploitation hydro-électrique du bassin sont des transferts d'eau entre bassins versants naturels et une modification de la saisonnalité du régime hydrologique (influence des retenues hydroélectrique : stockage d'eau au moment de la fonte nivale et déstockage en hiver pour la production d'énergie).

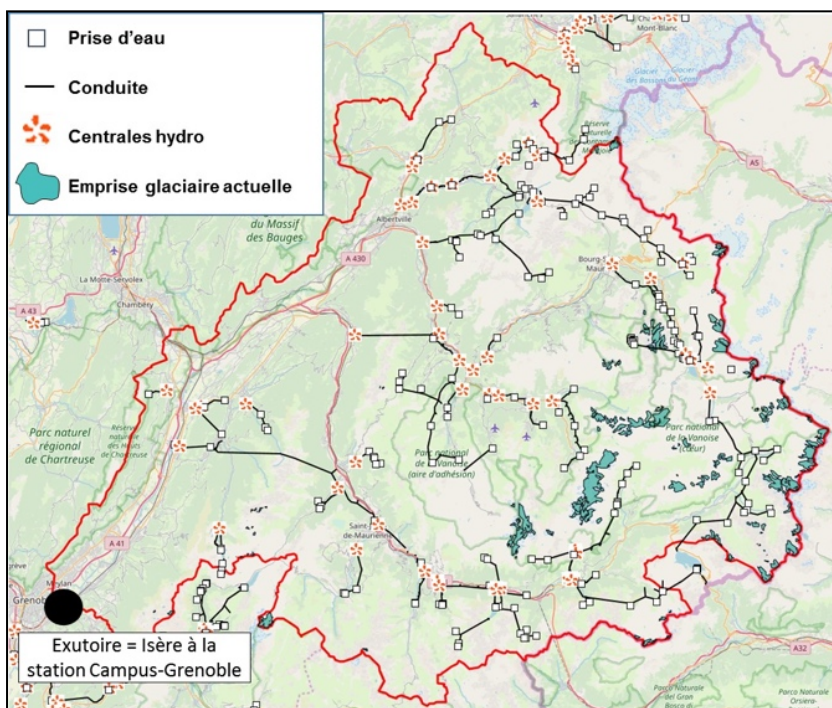


Fig. 1. Carte du bassin versant de l'Isère.

2.2 Données disponibles

Données climatologiques

Les données climatologiques utilisées ici sont issues de la ré-analyse SPAZM [3], spécialement conçue à EDF pour les zones de relief et largement utilisée pour l'hydrologie

de montagne depuis 10 ans. Elle fournit ici des précipitations et température d'air au pas de temps journalier et à la résolution de 1km, sur la période 1948-2017 (Fig. 2).

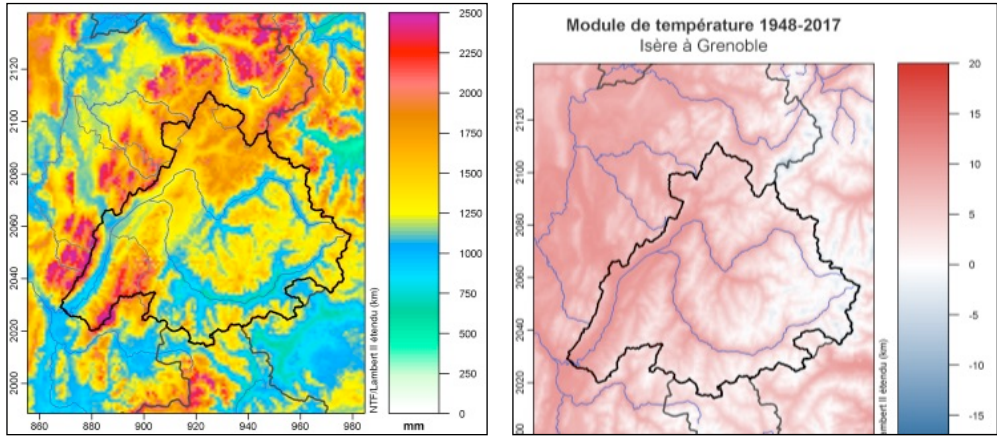


Fig. 2. Modules interannuels de précipitation et température SPAZM 1948-2017.

Données hydrométriques

28 chroniques de débit journalier ont été réunies, parmi lesquelles 7 sont issues de stations hydrométriques, 14 de données aménagement. Toutes ont été désinfluencées des aménagements hydro-électriques, de façon à obtenir des chroniques « naturalisées ». Parmi ces 28 chroniques de débit journalier, 23 séries ont été utilisées pour le calage du modèle (localisation et la disponibilité des séries présentées dans le paragraphe 2.3).

Données neige

Des chroniques de surfaces enneigées ont été calculées à partir du produit Fractional Snow Cover MOD10, issu des données satellitaire MODIS [4] et disponible au pas temps journalier depuis 2000 à résolution 500m. Sur chacune des mailles, un taux de couverture nuageuse maximal de 50 % est accepté, à partir duquel la donnée est considérée lacunaire. En deçà de cette valeur, les pixels manquants sont reconstitués via une régression FSC vs altitude, établie au jour j.

Données glaciologiques

Deux jeux de données d'emprise glaciaire ont été collectés : (i) les données issues de l'inventaire GlaRiskAlp [2], correspondant à la période 2006-2009 ; (ii) celles issues des cartes IGN Top25 de la fin des années 1970. Les données de bilans de masse glaciaire sont issues de [5]. Estimées à partir de données de télédétection sur la période 1984-2014, elles couvrent 30 glaciers alpins français, dont 14 situés sur le bassin de l'Isère.

2.3 Modélisation hydrologique du bassin

La réponse hydrologique du bassin a été simulée grâce au modèle hydrologique MORDOR-TS [1]. Il s'agit de la version spatialement distribuée du modèle MORDOR-SD [6], développé à EDF-DTG et très largement utilisé pour les études et prévisions hydrologiques d'EDF.

Dans cette version, le bassin versant est découpé en mailles hydrologiques, elles-mêmes découpées en bandes d'altitude d'égale surface. À chaque pas de temps, le module de production du modèle MORDOR-SD, i.e. les échanges entre les différentes entités du cycle hydrologique (rivière, atmosphère, réservoir profond, stock de neige, etc.), est appliqué indépendamment sur chacune des mailles du domaine. Cela implique que sont calculées autant de contributions totales à l'écoulement que de mailles. Ainsi, tout exutoire de maille est un point de simulation potentiel. Le routage des écoulements est ensuite effectué. Il comprend le routage intra-maille (transfert de l'écoulement produit sur une maille jusqu'à son exutoire) et inter-mailles (transfert maille à maille jusqu'aux points de simulation). Le schéma fonctionnel du modèle MORDOR-TS est illustré sur la Fig. 3 (voir [1] et [6] pour description détaillée des équations).

Le module de production est composé de cinq réservoirs associés à une variable d'état, à savoir le stock de neige, le stock superficiel, le stock évaporant, le stock intermédiaire et le stock profond. Les forçages météorologiques (pluie et température) sont répartis sur chaque bande d'altitude via des gradients orographiques. Les modules neige et pluie-débit du modèle permettent de calculer la part nivale de l'écoulement, et distinguent trois composantes d'écoulement (ruissellement de surface, écoulements de versant et débit de base). Le module glaciaire, lorsqu'activé et sur les bandes d'altitude concernées, est alimenté par la neige résiduelle de fin d'été et produit une lame de fonte par une formulation de type degré-jour.

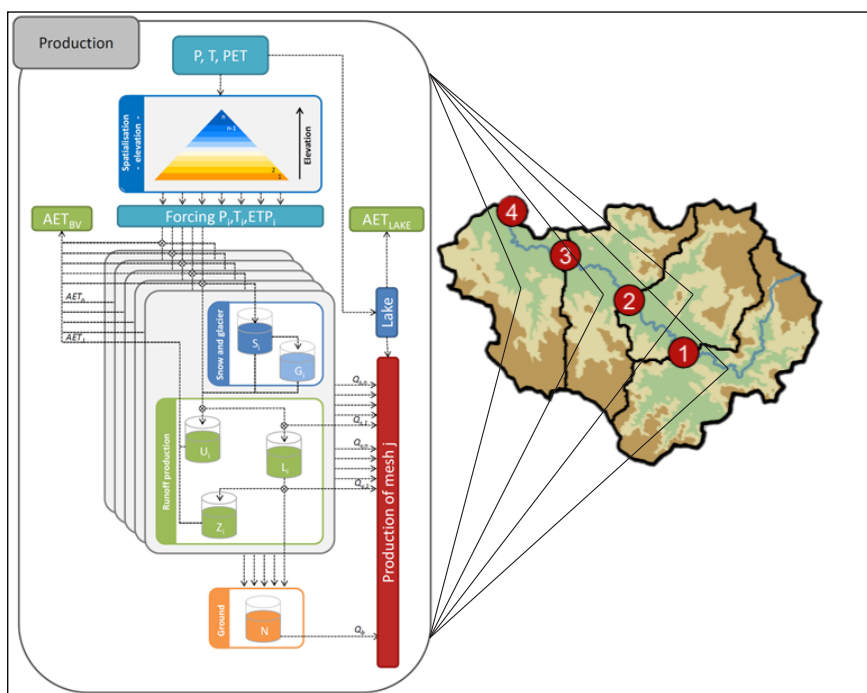


Fig. 3. Schéma fonctionnel du modèle MORDOR-TS.

Sur le bassin de l'Isère, le modèle a été implémenté à une résolution spatiale d'environ 30 km², adaptée aux principaux bassins d'alimentation des aménagements hydro-électriques. Chacune des 245 mailles ainsi obtenues est elle-même découpée en 4 bandes d'altitude pour prendre en compte la variabilité orographique intra-maille.

Le modèle a été calibré sur la période 1986-2017, pour exploiter au mieux la disponibilité des données hydrométriques. Les motifs spatiaux de paramètres ont été identifiés en croisant les données hydrométriques et les descripteurs physio-climatiques disponibles sur le bassin, à partir de l'approche développée par [7]. In fine, 23 séries hydrométriques disponibles au pas de temps journalier ont été valorisées dans le calage. 7 séries, trop anciennes, lacunaires ou peu fiables ont également été valorisées pour juger de la robustesse du modèle sur des points intérieurs non-jaugés. La Fig. 4 illustre le maillage du bassin et la localisation des différents points de contrainte. Les points de contrainte sont répartis de la manière suivante : 23 points de calage ; 7 points de contrôle (données hydrométriques non utilisées pour le calage) ; 86 points d'intérêt qui correspondent aux principaux bassins d'alimentation des aménagements hydro-électriques pour lesquels aucune donnée hydrométrique n'est disponible.

L'optimisation est réalisée via un algorithme multi-objectifs (CaRamel [8]) permettant d'identifier les fronts de Pareto dans l'espace des composantes de la fonction-objectif utilisée. Cet espace est ici composé de 3 critères, tous basés sur la métrique KGE (Efficience de Kling-Gupta [9]) :

- KGE(Q) : KGE appliquée au débit journalier
- KGE(RegQ) : KGE appliqué au régime interannuel des débits
- KGE(Qclmp) : KGE appliqué aux débits classés mensuels, pondérés par le module mensuel.

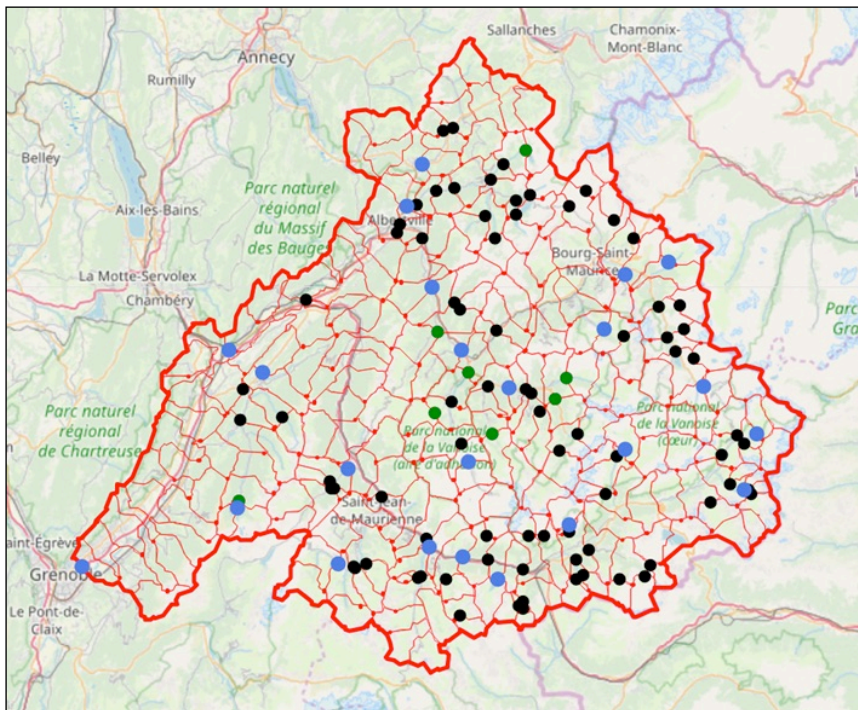


Fig. 4. Maillage MORDOR-TS du bassin de l'Isère et localisation des différents points de contrainte (Points de calage en bleu, points de contrôle en vert et points d'intérêt en noir).

Le critère KGE(Q) mesure la qualité 'générale' du modèle, à la fois en termes de volume et de temporalité. Le critère KGE (RegQ) s'intéresse à la reproduction du régime

hydrologique, et le critère KGE (Qclmp) s'intéresse-lui à la dimension fréquentielle, particulièrement pour les forts débits. À l'issue de ce calage, on obtient des motifs de paramètres comme illustré, à titre d'exemple sur la Figure 5, pour le paramètre kr contrôlant la partition entre écoulements de surface et souterrains.

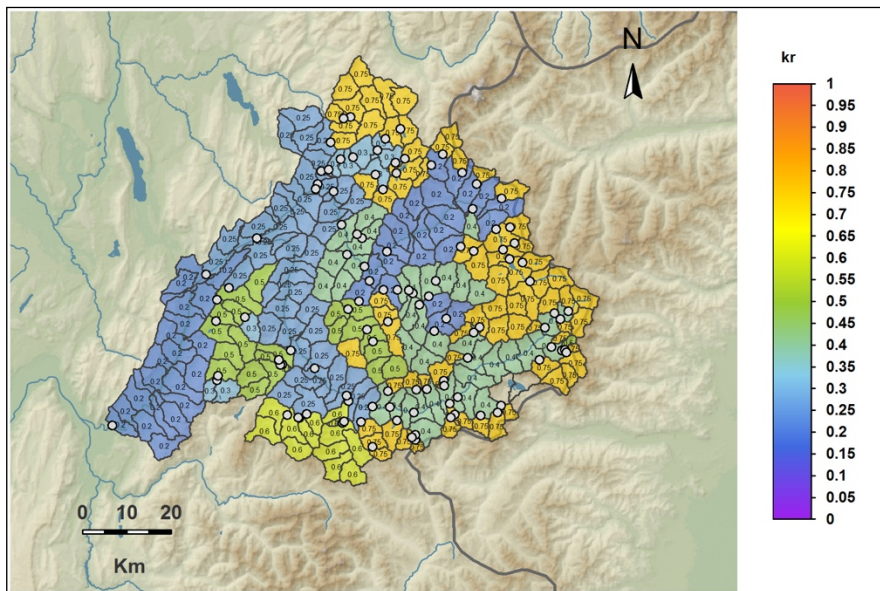


Fig. 5. Exemple de motif de paramètre obtenu à l'issue du calage. Paramètre kr , contrôlant la partition entre écoulements de surface et souterrains.

2.4 Construction des scénarios climatiques

Climat redressé

La non-stationnarité actuelle du climat nous conduit à distinguer l'hydrologie historique, le plus souvent issue des observations hydro-climatologiques disponibles depuis quelques décennies, de l'hydrologie actuelle, correspondant au climat d'aujourd'hui.

Cette hydrologie n'est par définition observée que sur des périodes de temps courtes et récentes, insuffisantes pour caractériser statistiquement l'aléa. On utilise donc le terme de climat *redressé* pour définir le climat actuel, débarrassé des tendances observées du réchauffement climatique. Très concrètement, les tendances sur les températures d'air sont identifiées entre 1980 et aujourd'hui (les années 80 marquant le début de l'élévation rapide des températures observée en France), de façon saisonnalisée. À partir de ces tendances, on peut construire des nouvelles séries de température, dites *redressées*, couvrant la période d'observation historique et représentative des températures actuelles. Un tel redressement n'est en revanche pas réalisé sur les précipitations, variable pour laquelle les tendances observées sont beaucoup moins significatives.

Il est alors possible de reconstituer un aléa hydrologique représentatif du climat actuel, sur la période historique, en simulant les écoulements en utilisant les nouvelles températures dites *redressées*. En d'autres termes, ces reconstitutions tiennent compte, dès à présent, de

l'effet de l'augmentation des températures (changement climatique) constaté et permettent d'évaluer l'impact de cette augmentation sur l'hydrologie actuelle.

Projections climatiques

Les projections hydrologiques sont réalisées sur la base des projections climatiques issues de l'exercice CMIP5 du GIEC [10], pour 2 scénarios d'émissions : RC4.5 (stabilisation des émissions à horizon 2100) et RCP8.5 (scénario d'augmentation des émissions, dit scénario pessimiste). Pour chacun de ces 2 scénarios RCP4.5 et RCP8.5 [11], 17 trajectoires d'évolution des précipitations et températures sont construites à la résolution spatiale du modèle hydrologique. Ces 17 trajectoires sont élaborées en couplant 17 projections GCM (General Circulation Model) à une méthode de descente d'échelle statistique de type « Analogues » [12]. Cette descente d'échelle, qui se base sur la relation d'échelle entre une situation atmosphérique à l'échelle synoptique et les variables météorologiques locales, permet de générer des chroniques de précipitation et température d'air journalières sur la période 1979-2100 et sur l'ensemble du bassin.

3 Évaluation de la modélisation

Les performances de modélisation sont résumées sur la Fig. , à partir de 4 statistiques : (i) KGE(Q), (ii) KGE (regQ), (iii) KGE (Qclmp), (iv) KGE (etg). Les 3 premières sont celles utilisées lors du calage (cf. paragraphe 2.3). La dernière correspond au critère KGE appliqué sur les séquences de récession de la période d'étiage. In fine, ces 4 métriques peuvent être associées à 4 signatures hydrologiques, respectivement nommées Débit, Régime, Crues et Etiages.

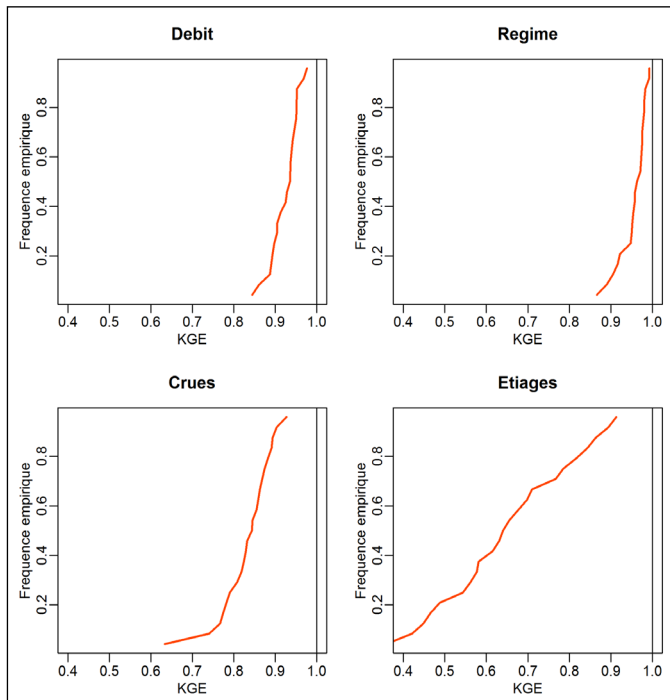


Fig. 6. Distribution des performances, sur les 30 séries observées (calage et contrôle).

Les performances sont globalement très satisfaisantes, avec un KGE(Q) et un KGE (RegQ) supérieurs à 0.85 sur tous les points. Les performances obtenues sur les signatures Crues et Étiages sont plus hétérogènes. Les performances constatées sur les étiages, en particulier, sont associées à des observations de qualité très hétérogènes, et souvent médiocres (gel hivernal de l'écoulement ou des capteurs, données aménagement très incertaines, etc.). La Fig. illustre les régimes hydrologiques interannuels (sur la période de calage) observés (en bleu) et simulés (en rouge) sur quelques-uns des points de calage du bassin.

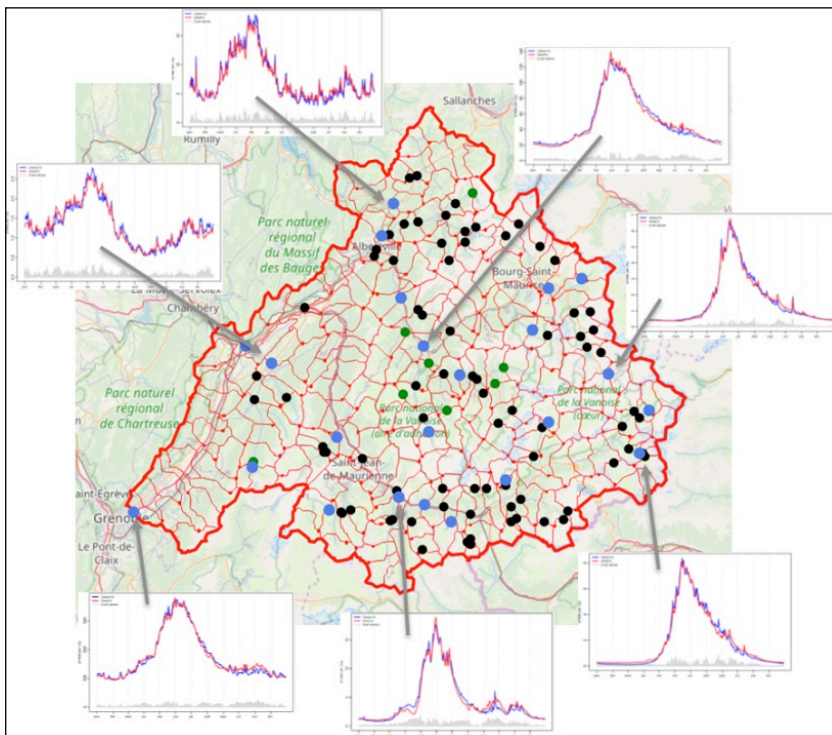


Fig. 7. Exemples de régimes hydrologiques observés (en bleu) et simulés (en rouge).

Les performances de la modélisation nivale sont évaluées en comparant la fraction enneigée modélisée et le FSC MODIS sur chaque maille du modèle. Les valeurs de KGE sont calculées sur l'ensemble des dates de disponibilité du FSC MODIS où l'enneigement est non nul. Étant données les incertitudes inhérentes à ce type d'observations, les performances obtenues sont tout à fait acceptables, avec un KGE supérieur à 0.6 sur plus de 80 % des mailles.

Le compartiment glaciaire est lui évalué en comparant le bilan de masse simulé sur chacune des mailles glaciaires du modèle avec les références issues de [5] et disponibles sur la période 1984-2014 (Fig.8). Deux emprises spatiales des glaciers sont considérées : (i) celle issue de l'inventaire GlaRiskAlp [2], retenue pour le calage du modèle et correspondant à la période 2006-2009 ; (ii) celle issue des cartes IGN Top25 et correspondant à la fin des années 1970. Dans le modèle hydrologique, le calcul de la fonte glaciaire nécessite une hypothèse de fraction d'occupation glaciaire, pour chaque bande d'altitude et chaque maille. Dans la version implémentée ici, il n'est pas possible de faire varier ces emprises glaciaires au cours de la simulation. Or le bilan de masse modélisé à l'échelle du glacier dépend de sa superficie, d'où les résultats différents obtenus à partir de ces 2 jeux de données. In fine, étant données

les limites de modélisation glaciaire, ainsi que l'incertitude d'estimation des bilans de masse par télédétection [5], on considère ici la modélisation suffisamment réaliste et acceptable en l'état.

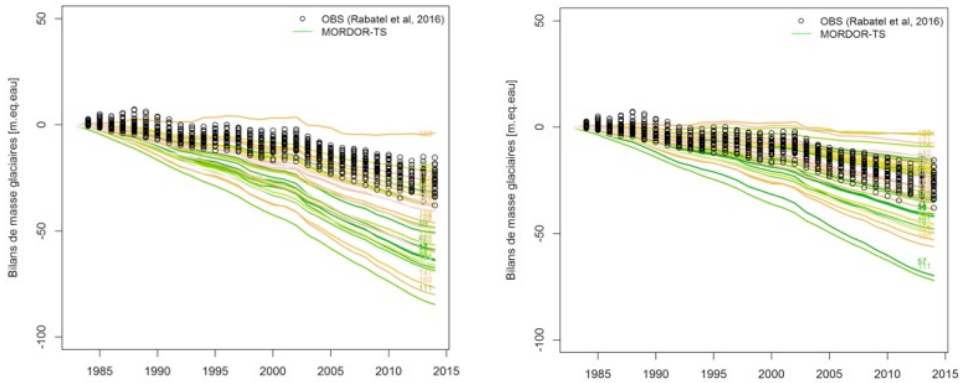


Fig. 8. Bilans de masse glaciaires évalués par maille pour 2 choix d'extension spatiale : GlaRiskAlp (à gauche) et IGN Top 25 (à droite).

4 Variabilité et tendances hydrologiques récentes

Variabilité hydrologique récente

La variabilité hydrologique interannuelle est illustrée, à l'échelle de l'ensemble du bassin, par la Fig. 9. Parmi les éléments remarquables, on note : (i) l'augmentation de la température moyenne, de l'ordre de 2°C sur les 30 dernières années ; (ii) l'augmentation associée de la part évaporative, de l'ordre de 10 % sur la même période ; (iii) la baisse du stock de neige moyen et de la fraction enneigée moyenne ; (iv) l'augmentation de la part glaciaire des écoulements, passée d'environ 2 % à près de 4 % sur les 30 dernières années.

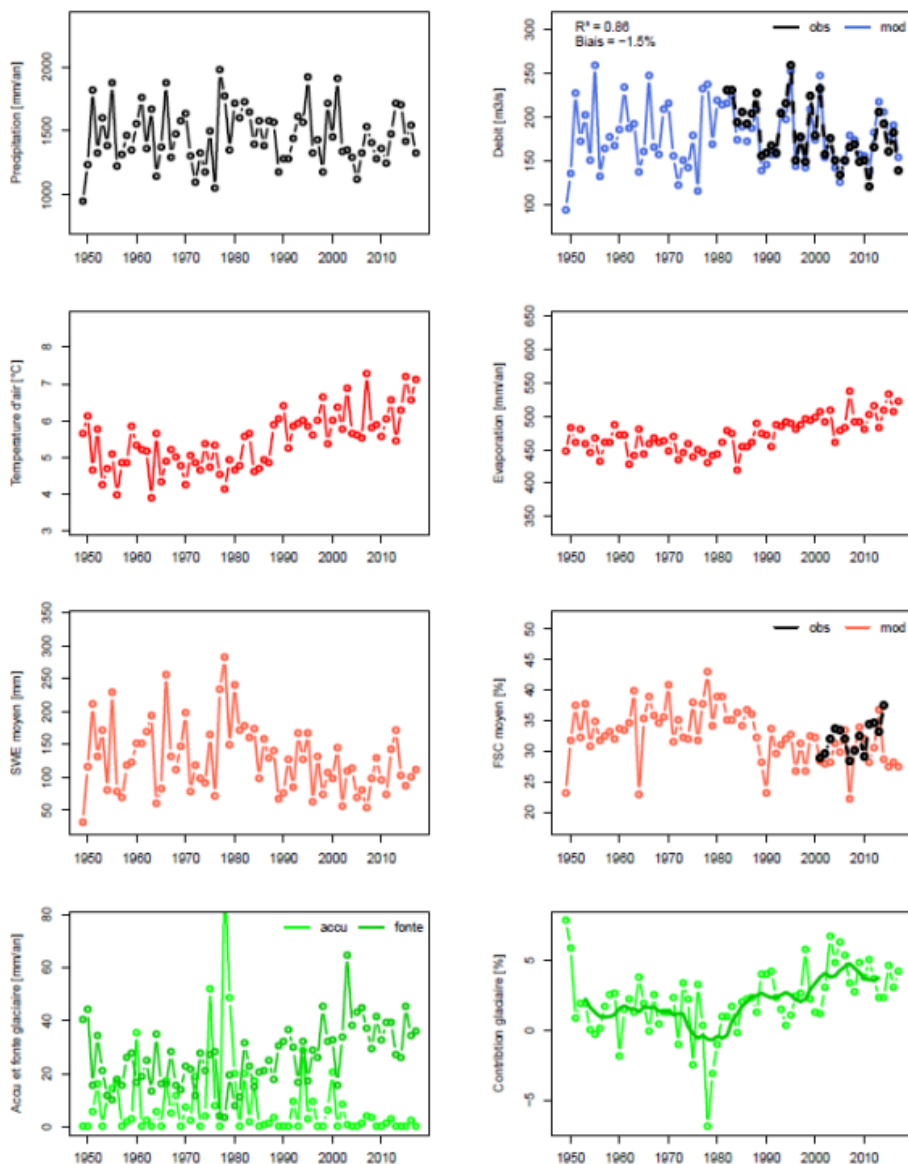


Fig. 9. Variabilité hydrologique sur le bassin de l’Isère à Grenoble, pour la période 1948-2017.

Effet de l’augmentation des températures

La construction de températures dites redressées (cf. paragraphe 2.4) permet de simuler, sur la période historique, une hydrologie représentative du climat actuel. Et donc de quantifier l’impact de l’augmentation des températures observées depuis les années 80.

La Fig. 10 présente la carte des variations des écoulements entre la simulation ‘redressée’ et la simulation ‘historique’, en module interannuel sur la période 1948-2017. Ces variations sont très contrastées à l’échelle du bassin de l’Isère. Sur les mailles les moins en altitude, les diminutions de débit sont de l’ordre de -4 à -7 %, associées à l’effet de la hausse des températures sur l’évapotranspiration. Au contraire, sur les mailles d’altitude avec présence

glaciaire, les débits sont en hausse, localement jusqu'à environ +20 %, par effet de l'intensification de la fonte glaciaire.

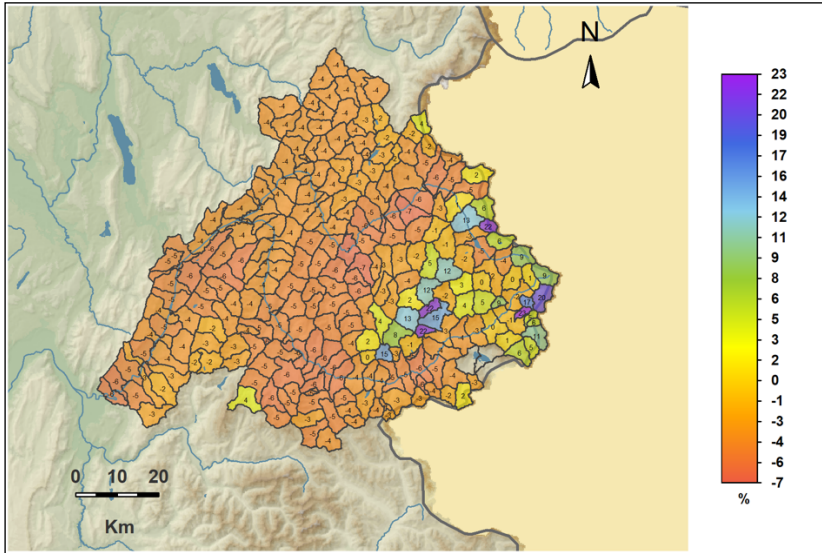


Fig. 10. Écart relatif des modules de débits interannuels 1948-2017, entre les simulations climat redressé et climat historique.

L'évolution de la saisonnalité des écoulements est illustrée sur la Fig. 11, qui représente la carte du décalage moyen, sur la période 1948-2017, du pic d'onde de fonte nivale (en jours). On retiendra surtout l'ordre de grandeur de ce décalage, correspondant à une avancée d'environ 15 jours de l'onde de fonte. En effet, les incertitudes liées à son identification (à partir d'un lissage du régime hydrologique) compliquent son interprétation, en particulier sur les mailles les moins en altitude, à l'aval du bassin, où l'onde de fonte est moins marquée.

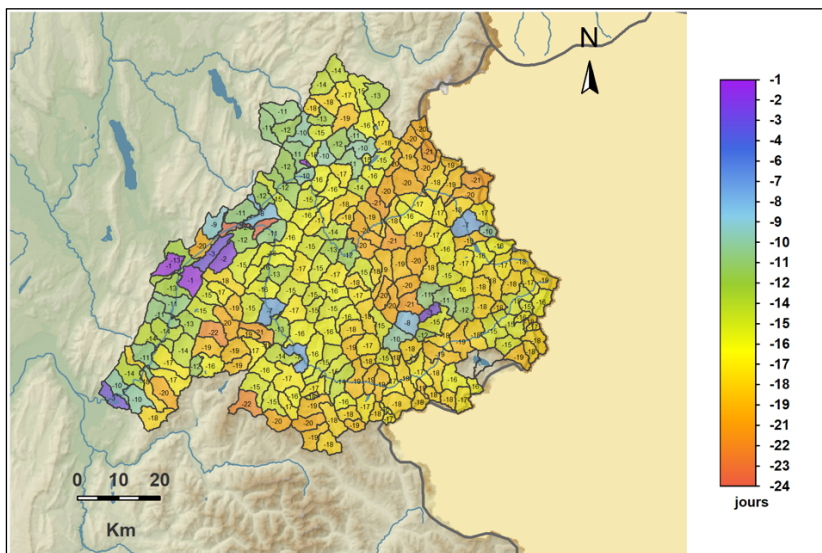


Fig. 11. Décalage moyen du pic de fonte nivale sur la période 1948-2017, entre les simulations climat redressé et climat historique.

La Fig. 12 permet d'illustrer, à l'échelle du bassin de l'Isère à Grenoble et sur la période 1948-2017, l'effet des températures dites redressées (cf. paragraphe 2.4) à la fois sur le débit et l'évapotranspiration. Sur l'ensemble de la période, l'augmentation moyenne de la température de $+0.8^{\circ}\text{C}$ se traduit par une augmentation de l'évapotranspiration de $+6.6\%$. En revanche, la diminution des débits est moins marquée, de l'ordre de -1.4% , du fait de l'effet compensateur lié à l'accélération de la fonte glaciaire. Sur la saisonnalité des écoulements, enfin, cela se traduit par une avancée du pic de fonte nivale de l'ordre de 15 jours.

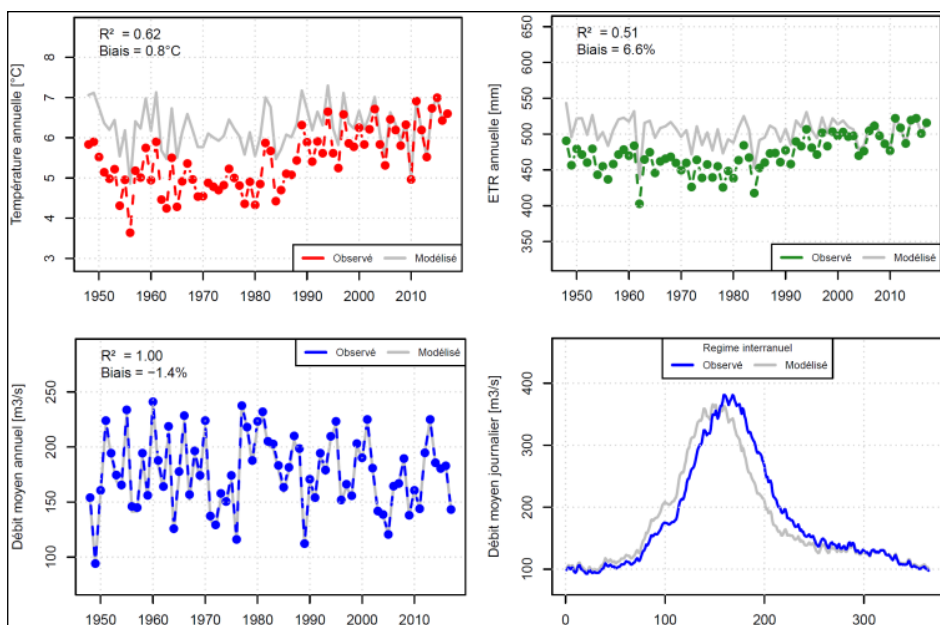


Fig. 12. Effet des températures dites redressées sur l'évapotranspiration et les débits – Bassin de l'Isère à Grenoble, période 1948-2017.

5 Évolution future

La construction de scénarios climatiques sur le bassin, telle que détaillée au paragraphe 2.4, permet de simuler l'évolution des débits de l'Isère au cours des prochaines décennies.

La Fig. 13 illustre, à titre d'exemple, les projections hydrologiques réalisées à Grenoble, exutoire du bassin. Les projections à horizon 2100 des précipitations, températures, évapotranspiration, débit et neige y sont résumées, pour les 2 scénarios d'émission RCP4.5 et RCP8.5. De façon très synthétique, on peut noter :

- Des précipitations en légère baisse, de l'ordre de -6% entre la période 1979-2100 et la période 1948-2017, et ce pour les 2 scénarios ;
- Des températures en hausse, respectivement de l'ordre de $+1.5^{\circ}\text{C}$ et $+2.2^{\circ}\text{C}$ entre la période 1979-2100 et la période 1948-2017 pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 ;
- Une évapotranspiration en hausse, respectivement de l'ordre de $+10\%$ et $+14\%$ entre la période 1979-2100 et la période 1948-2017 pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 ;
- Un enneigement en baisse, respectivement de l'ordre de -33% et -41% entre la période 1979-2100 et la période 1948-2017 pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 ;

- Des débits relativement stables entre la période 1979-2100 et la période 1948-2017, et ce pour les 2 scénarios (-0.2 et -1.3 %, respectivement pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5).

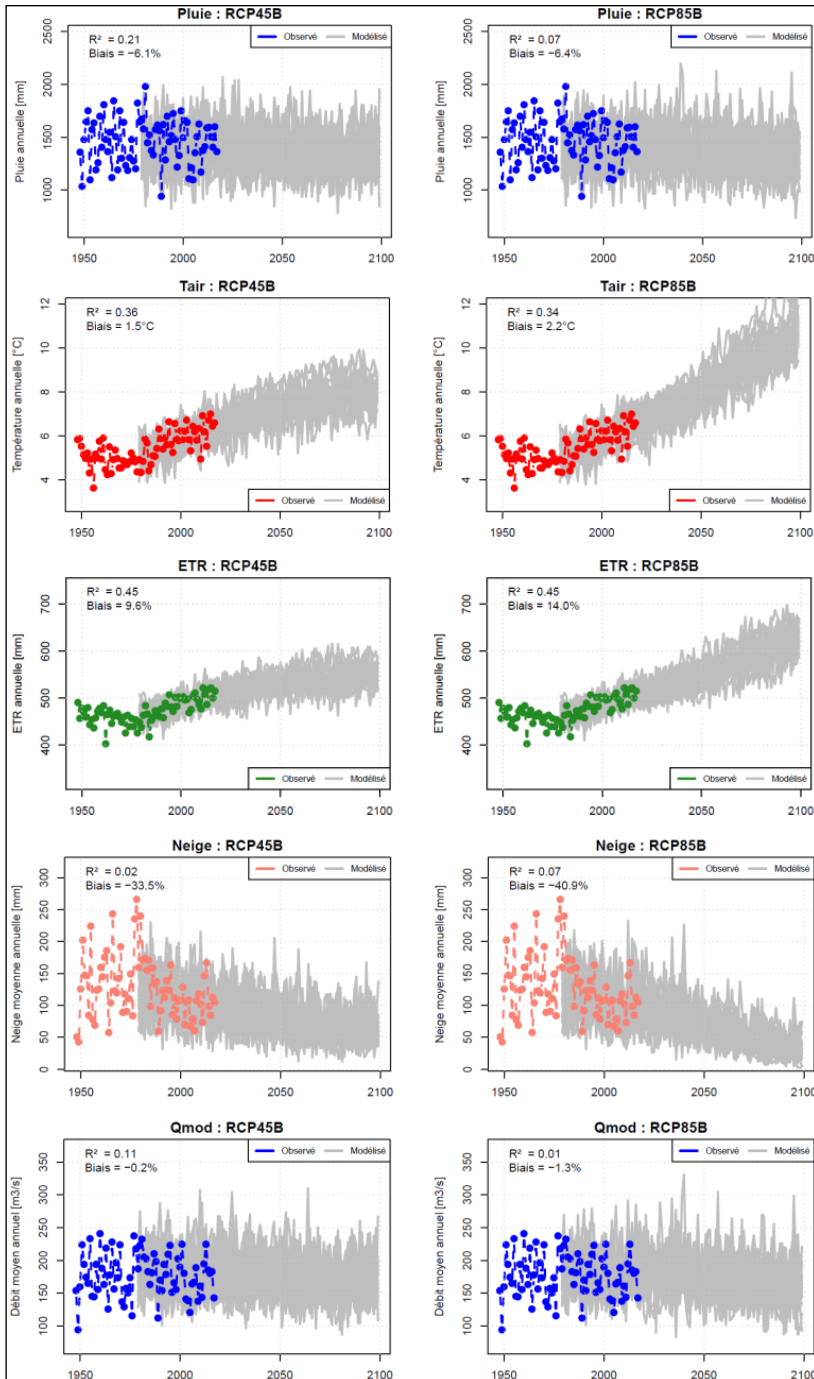


Fig. 13. Synthèse des projections hydrologiques sur le bassin de l'Isère à Grenoble, pour les scénarios RCP4.5 (à gauche) et RCP8.5 (à droite).

L'incertitude inhérente à ce type de projections est largement connue et documentée (incertitudes sur les scénarios d'émission, les projections GCM, les descentes d'échelles et la modélisation hydrologique). Néanmoins, à ces incertitudes s'ajoute une hypothèse inexacte utilisée ici, à savoir l'absence d'évolution de l'extension glaciaire au cours du XXI^e siècle. Cette hypothèse explique la relative stabilité des débits constatée précédemment, puisqu'elle permet à la fonte glaciaire de compenser l'augmentation de l'évapotranspiration et la légère baisse des précipitations. Or cette hypothèse apparaît très peu réaliste, en particulier au-delà de 2050 ([13], [14]). Au moment de la réalisation de ces travaux, l'absence d'éléments prospectifs sur l'évolution future des glaciers à l'échelle du bassin versant de l'Isère à Grenoble n'a pas permis de raffiner cette hypothèse. Dans des travaux futurs, les scénarios d'évolution issus de [14] seront intégrés pour produire des projections de débit plus proches de la réalité.

6 Conclusions

La mise en œuvre d'une modélisation hydrologique spatialement distribuée sur l'Isère à Grenoble, bassin de montagne et fortement anthropisé, est un exercice complexe qui nécessite : (1) des forçages météorologiques robustes, (ii) la reconstitution d'une hydrologie désinfluencée de l'exploitation hydro-électrique du bassin (transfert d'eau et stockage saisonnier dans les retenues), et (3) la prise en compte de la contribution glaciaire au régime d'écoulement. Les bonnes performances du modèle MORDOR-TS développé ici nous ont permis de reconstruire, avec une robustesse satisfaisante, la variabilité hydro-météorologique passée sur l'ensemble du bassin. L'augmentation des températures depuis les années 80 a été prise en compte, pour définir un aléa hydrologique redressé des tendances observées. Nos simulations montrent une baisse des écoulements de l'ordre de 5 % sur une grande partie du bassin, liée à l'intensification de la reprise évaporative, et au contraire une augmentation sur les bassins les plus en altitude, liée à l'accélération de la fonte glaciaire. Le régime d'écoulement est également modifié, avec un pic de fonte avancé d'environ 15 jours dans la saison. Selon les projections hydrologiques réalisées sur la période 2020-2050 à partir de ce modèle, le changement climatique semble avoir un impact plus prégnant sur le régime hydrologique (avancée de l'onde de fusion) que sur le module. En effet, l'augmentation de l'évapotranspiration et la légère baisse des précipitations pourrait être compensées, de manière transitoire, par une accentuation de la fonte glaciaire. Au-delà de 2050, de forts impacts sont à attendre à la fois sur le régime et sur le module, notamment en raison du recul des glaciers et de la baisse de leur contribution à l'écoulement. Ces résultats devront être raffinés, notamment par la prise en compte de l'évolution future des glaciers du bassin versant. Néanmoins ce travail reste inédit et permet de disposer dès à présent d'éléments prospectifs sur l'évolution récente (Climat historique et Climat redressé) et future du régime hydrologique sur l'ensemble du bassin versant de l'Isère à Grenoble.

Références

1. L. Rouhier, M. Le Lay, F. Garavaglia, N. Le Moine, F. Hendrickx, C. Monteil, P. Ribstein, Impact of mesoscale spatial variability of climatic inputs and parameters on the hydrological response, *Journal of Hydrology*, 553 :13–25 (2017)
2. M. Gardent, A. Rabatel, J. P. Dedieu, P. Deline, Multitemporal glacier inventory of the French Alps from the late 1960s to the late 2000s, *Global and Planetary Change*, 120, 24-37 (2014)

3. F. Gottardi, C. Obled, J. Gailhard, E. Paquet, Statistical reanalysis of precipitation fields based on ground network data and weather patterns: Application over French mountains, *Journal of Hydrology*, 432-433, 154–167 (2012)
4. D. K. Hall, G. A. Riggs, V. V. Salomonson, MODIS/Terra Snow Cover 5-Min L2 Swath 500m, Version 5, Boulder, Colorado USA: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center (2006)
<http://dx.doi.org/10.5067/ACYTYZB9BEOS>
5. A. Rabatel, J. P. Dedieu, C. Vincent, Spatio-temporal changes in glacier-wide mass balance quantified by optical remote sensing on 30 glaciers in the French Alps for the period 1983-2014, *Journal of Glaciology* 62 (236). 1-14 (2016)
6. F. Garavaglia, M. Le Lay, F. Gottardi, R. Garçon, J. Gailhard, E. Paquet, T. Mathevet, Impact of model structure on flow simulation and hydrological realism: from lumped to semi-distributed approach, *Hydrology and Earth System Sciences*,
<https://doi.org/10.5194/hess-35-2017-82> (2017)
7. 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, Thèse de doctorat de Sorbonne Université. 379 p. (2018)
8. C. Monteil, F. Zaoui, N. L. Moine, F. Hendrickx, Multi-objective calibration by combination of stochastic and gradient-like parameter generation rules—the caRamel algorithm, *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(6), 3189-3209 (2020)
9. H. V. Kling, K. K. Yilmaz, G. F. Martinez, Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling, *Journal of Hydrology*, 377(1-2): 80–91 (2009)
10. IPCC (2014), *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III of the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Core Writing team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)), IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
11. M. Meinshausen, S.J. Smith, K. Calvin et al, The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300, *Climatic Change* 109, 213-241 (2011)
12. A. Kuentz, T. Mathevet, J. Gailhard, B. Hingray, 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 Discussions*, 12(1), 311-361 (2015)
13. H. Zekollari, M. Huss, D. Farinotti, Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble, *The Cryosphere*, 13(4), 1125-1146 (2019)
14. J. Bolibar, Past and future evolution of French Alpine Glaciers in a changing climate: a deep learning glacio-hydrological modelling approach, Thèse de Doctorat de l'Université Grenoble Alpes, 126p. (2020)