

Estimation spatiale des précipitations et assimilation de données de débit pour la prévision hydrologique en milieu alpin

Alain Foehn, Javier García Hernández, Giovanni De Cesare, Andrea Rinaldo, Bettina Schaeffli, Anton J. Schleiss

Résumé

L'étude présentée propose des solutions à certains défis rencontrés dans le cadre du système de prévision et de gestion des crues MINERVE du Canton du Valais, opérationnel depuis 2013. Le premier axe de recherche est dédié à l'interpolation spatiale des précipitations en combinant les données radar et celles des pluviomètres à l'aide d'un co-krigeage avec régression. Une correction de la sous-capture des précipitations solides aux pluviomètres est explorée avec des facteurs correcteurs appliqués au niveau des stations avant interpolation. Les estimations quantitatives de précipitations obtenues sont ensuite utilisées dans un modèle de simulation de l'enneigement, en utilisant des données satellitaires pour le calage. La comparaison des équivalents en eau de la neige simulés avec des mesures au sol suggère que la méthodologie explorée de correction des précipitations permet de réduire fortement la sous-estimation de la quantité de neige. Le calage du modèle hydrologique de trois sous-bassins a montré qu'une amélioration des performances était ainsi possible en intégrant les estimations quantitatives de précipitations par rapport à l'utilisation uniquement des données de pluviomètres, mais que cela nécessitait une bonne visibilité du radar. Finalement, l'implémentation d'un filtre de Kalman d'ensemble pour assimiler des données de débit dans le système de prévision est explorée.

Räumliche Abschätzung von Niederschlägen und die Verwendung von Abflussdaten für die hydrologische Vorhersage in alpinen Gebieten Zusammenfassung:

In der vorgestellten Studie wurden verschiedene Lösungen erarbeitet, um die Herausforderungen des Hochwasservorhersage- und Managementsystems MINERVE zu bewältigen, das seit 2013 für den Kanton Wallis in Betrieb ist. Der erste Forschungsschwerpunkt konzentrierte sich auf die räumliche Verteilung des Niederschlags durch die Kombination von Radar- und Regenmessungen, basierend auf einem Co-Kriging-Ansatz mit Regression. Für die systematische Unterschätzung der festen (Schnee etc.) Niederschläge an Regenmessern wurde fixen Korrekturfaktoren ermittelt. Die daraus resultierende, quantitative Niederschlagsabschätzung wurde dann in einem Schneemodell verwendet, wobei die Kalibrierung mit Satellitendaten erfolgte. Der Vergleich dieser simulierten Schneewasseräquivalente mit den bodengebundenen Messungen weist darauf hin, dass die untersuchte Niederschlagskorrekturmethode die Unterschätzung der Schneemenge deutlich reduzieren kann. Die Kalibrierung des hydrologischen Modells in drei Teileinzugsgebieten zeigte, dass eine deutliche Vorhersageverbesserung durch die Berücksichtigung der quantitativen Niederschlagsschätzung erreicht werden kann, im Gegensatz dazu, wenn nur die Daten von Regenmessstationen berücksichtigt werden. Allerdings ist eine gute Sichtbarkeit des Radars über die Teileinzugsgebiete erforderlich. Schliesslich wurde die Berücksichtigung eines Ensemble-Kalman-Filters zur Ermittlung der Abflussdaten im Prognosesystem untersucht.

1. Introduction

En Suisse, les crues sont responsables de la majorité des dégâts liés aux dangers naturels, avec un coût moyen estimé sur les quatre dernières décennies à CHF 306 millions par année (*Andres et Badoux, 2019*). Le Canton du Valais est particulièrement exposé de par sa topographie et sa météorologie. En octobre 2000, d'importantes précipitations ont généré des crues ayant mené à la mort de 16 personnes et des dégâts estimés à CHF 470 millions (*OFEG, 2002*). Le projet MINERVE (Modélisation des Intempéries de Nature Extrême du Rhône Valaisan et de leurs effets) a été initié en 1999 pour conceptualiser et développer un système de prévision et de gestion des crues pour le Rhône à l'amont du Lac Léman (*Jordan, 2007; García Hernández, 2011; Tobin, 2012*). Il est basé sur un modèle hydrologique-hydraulique semi-distribué qui permet de modéliser l'écoulement dans les rivières du bassin en tenant compte des aménagements hydroélectriques. L'implémentation et la maintenance du système, ainsi que le suivi de la situation hydro-météorologique sont réalisés depuis 2011 sur mandat du Canton du Valais par le Centre de recherche sur l'environnement alpin (CREALP) à Sion. Le système est opérationnel pour l'ensemble du Canton depuis 2013.

En 2015, une thèse de doctorat a débuté à l'EPFL avec, pour objectif, d'améliorer certaines composantes du système opérationnel MINERVE, notamment l'estimation des précipitations, le calage du modèle de neige, ainsi que l'élaboration d'une méthodologie d'assimilation de données de débit en temps réel pour l'amélioration de la qualité des prévisions hydrologiques. Le présent article présente les principaux résultats de ce travail de thèse (*Foehn, 2019*).

2. Interpolation spatiale des précipitations

Les précipitations constituent un facteur clé dans la génération des crues. Il est important de pouvoir les estimer le plus correctement possible sur l'ensemble du territoire. Cependant, en présence d'une topographie complexe comme en Valais, cet exercice n'est pas simple. Heureusement, un nouveau radar météorologique a été installé à l'intérieur du bassin en juin 2014 au sud du glacier de la Plaine Morte (Figure 1), améliorant considérablement la qualité du produit radar en Valais. De plus, le réseau de mesure automatique SwissMetNet (SMN) de l'Office Fédéral de Météorologie et Climatologie (MétéoSuisse) y est particulièrement dense par rapport aux autres cantons (58 stations à fin 2017). Malgré cela, quantifier la variation spatiale des précipitations dans les régions alpines reste un défi important. Ainsi, afin de reproduire au mieux cette variabilité spatiale, la considération d'un second réseau de mesure, celui de la société privée Meteo Group Switzerland AG (MG), a été explorée pour l'analyse (23 stations supplémentaires). L'intégration de ce second réseau pour l'interpolation spatiale représente l'une des principales différences de cette étude (Foehn et al., 2018) par rapport au produit raster opérationnel de précipitations horaires Combiprecip de MétéoSuisse (Sideris et al., 2014). La seconde différence majeure réside dans l'étendue spatiale de l'analyse, qui ne concerne ici que le Valais, alors que Combiprecip est établi à l'échelle nationale.

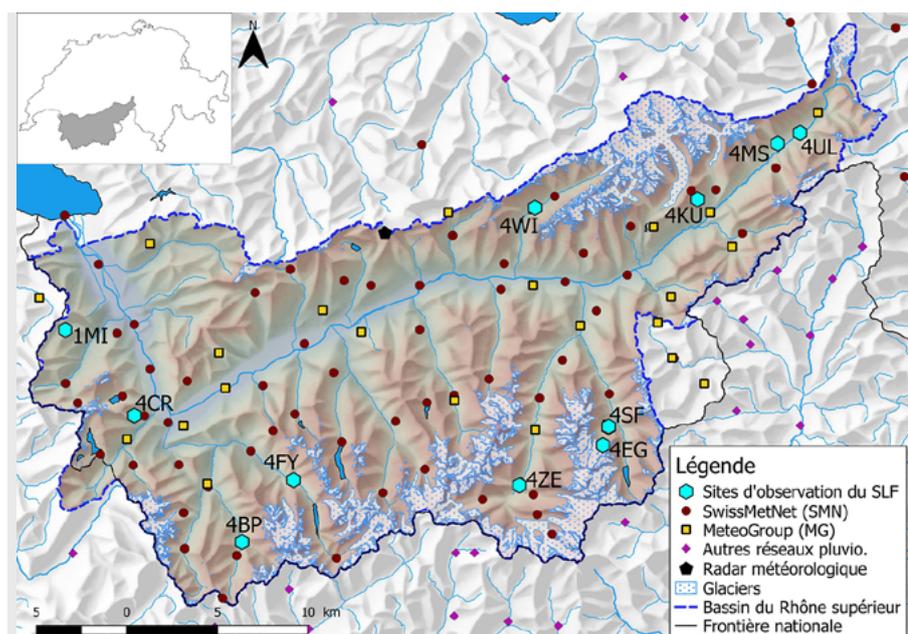


Figure 1: Carte du bassin du Rhône à l'amont du Lac Léman. L'emplacement des stations météorologiques (SwissMetNet et MeteoGroup) ainsi que les sites d'observation du SLF utilisés pour l'étude sont indiqués.

Les réseaux SMN et MG sont équipés avec des pluviomètres différents, ce qui implique une disparité dans la qualité de la mesure. Ainsi, lors de l'analyse préliminaire des données, l'écart entre précipitations moyennes entre les deux réseaux pouvait dépasser 20 %, les pluviomètres du réseau MG reportant moins de précipitations. Cela est en accord avec les résultats d'une étude de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) publiée en 2009 (Vuerich et al., 2009), qui conclut à une qualité «très bonne» et «satisfaisante» pour les équipements utilisés par MétéoSuisse (respectivement de la marque OTT et Lambrecht) et «insuffisante» pour ceux utilisés par MeteoGroup (de la marque Davis). Dans le but d'analyser le potentiel gain lié à la considération également des données du réseau MG pour l'interpolation spatiale des précipitations au pas de temps horaire, un co-krigeage avec régression est exploré parmi les différentes méthodes étudiées. L'application d'un co-krigeage permet de considérer deux variables en évaluant leur corrélation pour chaque pas de temps et ainsi compenser d'éventuels biais de mesures entre les réseaux.

a. Méthodes d'interpolation

Cinq différentes méthodes sont comparées. La première consiste à utiliser le produit radar de MétéoSuisse sans correction (résolution spatiale de 1 km). Cela permet d'évaluer la qualité du produit sans modification. La seconde méthode considère uniquement les valeurs des stations en y appliquant une interpolation en fonction

de l'inverse de la distance («inverse distance weighting-IDW» en anglais).

Les trois autres méthodes considèrent une combinaison de la donnée radar et des données de mesure au sol. Les premières étapes de calcul sont similaires pour les 3 méthodes:

1. La donnée radar (Raw Radar, Figure 2I) est dans un premier temps multipliée par un coefficient spatialement constant déterminé de manière horaire sur la base d'une régression linéaire entre les valeurs des pixels du radar contenant les stations SMN et les valeurs aux stations. Une tendance (grille) basée sur la donnée radar (Trend, Figure 2II) est ainsi calculée.
2. La différence entre les valeurs aux stations et la valeur du pixel de tendance contenant chaque station est ensuite calculée, fournissant les résidus aux stations. Ces résidus sont alors interpolés pour donner une grille de correction (Residuals, Figure 2III), ensuite additionnée à la tendance pour obtenir l'estimation finale des précipitations (Figure 2IV).
3. La manière d'interpoler les résidus différencie les 3 méthodes.
 - a. Dans la première, une interpolation en fonction de l'inverse de la distance est appliquée, donnant à cette méthode le nom de Regression Inverse distance weighting (RIDW).
 - b. La seconde applique un krigeage sur les résidus, il s'agit d'un krigeage simple considérant uniquement les données SMN, méthode nommée Regression kriging (RK).
 - c. Dans le troisième cas, un co-krigeage sur les résidus est implémenté considérant les données SMN comme variable principale et les données MG comme variable secondaire, donnant à cette méthode le nom de Regression co-kriging (RCK).

Pour les deux méthodes appliquant un krigeage pour l'interpolation des résidus, un variogramme (respectivement un modèle linéaire de co-régionalisation constitué de trois variogrammes pour la méthode RCK) doit être calculé automatiquement chaque heure (voir Foehn et al., 2018, pour les détails).

Afin de comparer les méthodes entre elles, différents indicateurs de performance sont calculés avec une validation croisée, c'est-à-dire que les valeurs en chaque point de mesure sont estimées à partir de toutes les autres données (en excluant celle de l'emplacement calculé). Ainsi, le Bias permet d'identifier des erreurs systématiques. La

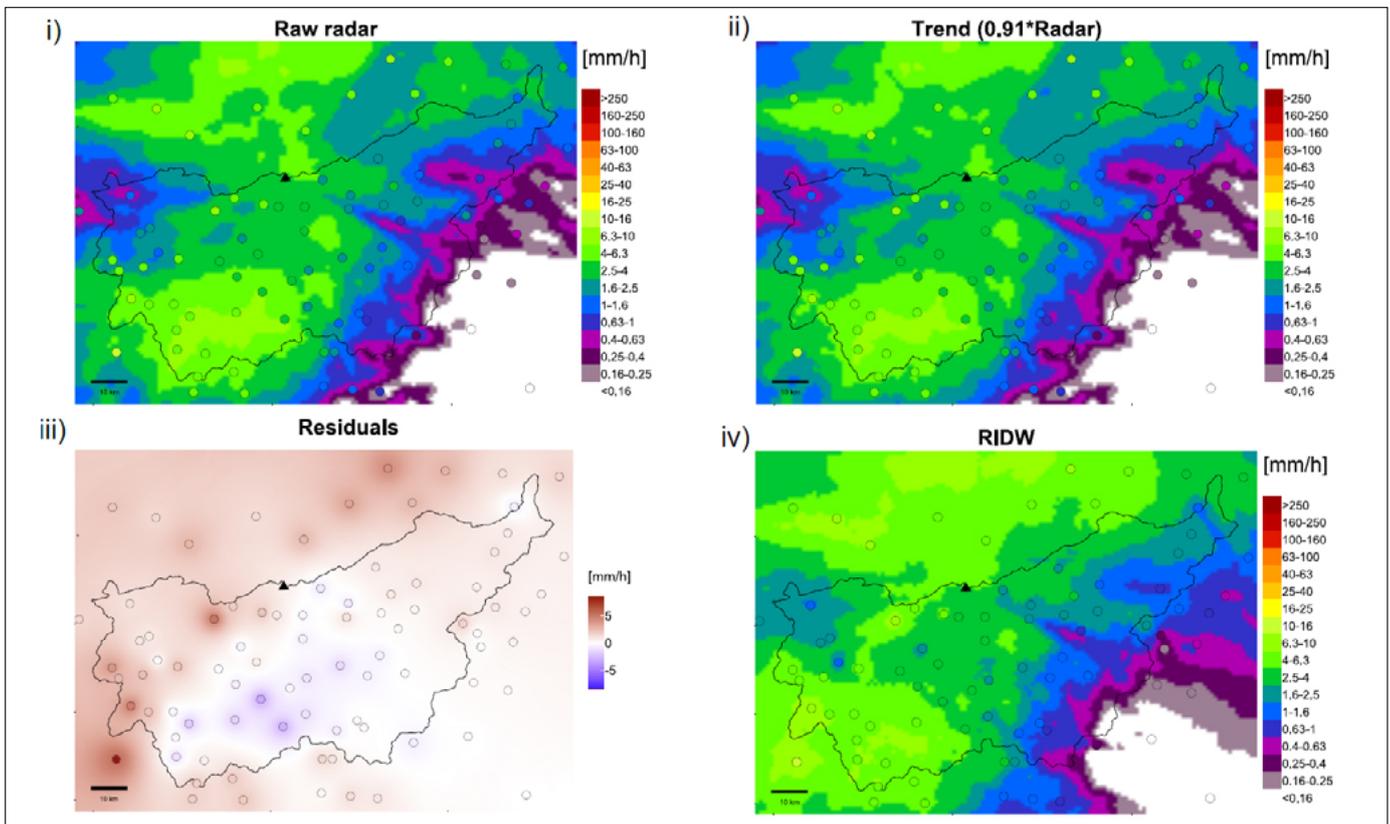


Figure 2: Différentes étapes dans l'interpolation spatiale des précipitations pour la méthode RIDW: la donnée radar (I) est dans un premier temps multipliée par un coefficient multiplicateur pour obtenir une tendance (II) ; les résidus aux stations (valeur à la station – valeur du pixel) sont ensuite calculés et interpolés spatialement pour obtenir une carte de correction (III); cette carte est additionnée à la tendance pour obtenir le résultat final (IV). Le triangle noir indique l'emplacement du radar de la Pointe de la Plaine Morte.

Median absolute deviation (MAD), la Root-Mean-Square Error (RMSE) et la Mean-Root-Transformed Error (MRTE) quantifient, quant à elles, l'erreur entre observations et estimations. Finalement, le Scatter fournit une mesure de la dispersion du ratio entre valeurs observées et estimées.

Ces indicateurs ont été calculés pour 4 événements de précipitations intenses répartis entre 2014 et 2017. Trois événements supplémentaires, survenus entre 2012 et 2014, ont été également étudiés pour analyser le scénario avant l'installation du radar de la Pointe de la Plaine Morte (PPM).

b. Résultats

Les résultats suggèrent que l'utilisation du radar sans correction présente les moins bonnes performances (Figure 3), avec notamment des problèmes de biais importants. Les différences de performances entre les 4 autres méthodes sont moins

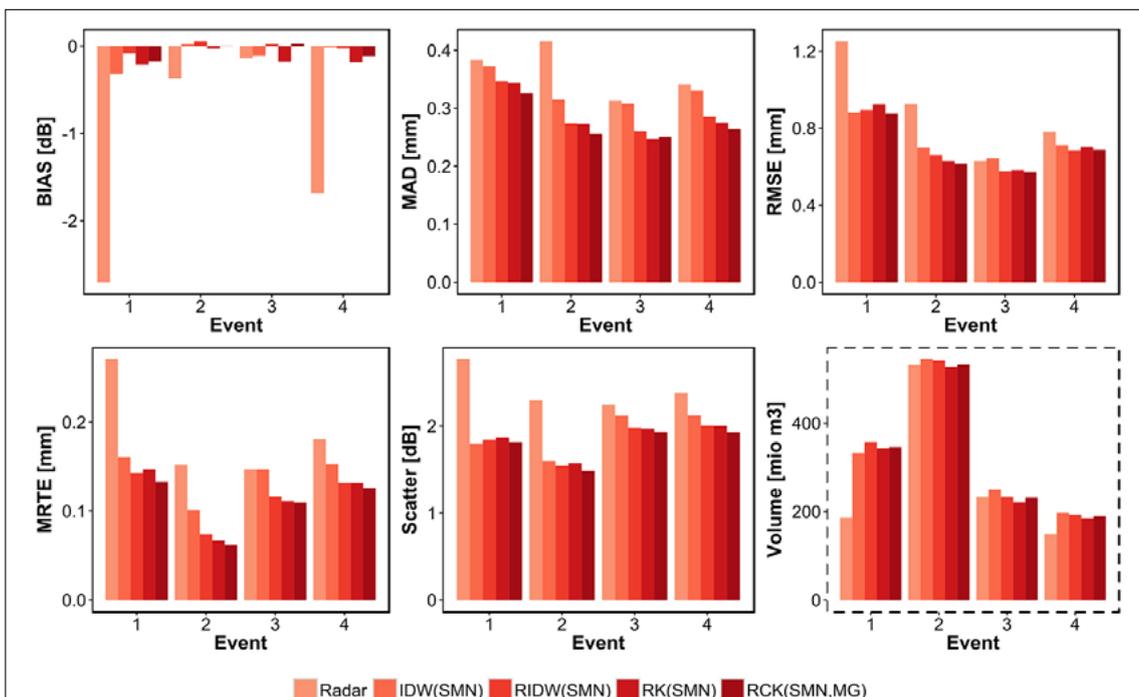


Figure 3: Indicateurs de performances pour les différentes méthodes d'interpolation, obtenus pour les 4 événements analysés.

élevées, avec cependant une tendance de la méthode RCK à présenter les meilleurs résultats. La méthode RCK permet d'ailleurs également d'obtenir de meilleures performances sur les 3 événements sans le nouveau radar (PPM), la rendant intéressante également pour le calcul de séries historiques, nécessaires pour une application hydrologique (résultats non présentés ici, voir *Foehn et al., 2018*).

L'application d'une transformation des données avant l'interpolation permet de réduire le Bias sur les 4 événements étudiés. Pour les autres indicateurs, les différences étaient faibles, voire quasi inexistantes.

L'analyse des résultats a également permis de mettre en évidence des zones de faible visibilité du radar. La plus évidente, en direction du sud-est, est bien visible sur la *Figure 2*. Cette zone d'ombre résulte de la présence du Mont Bonvin, culminant à une altitude de 2994 m.s.m., soit 68 m plus haut que l'altitude du radar. Avec un tel obstacle, la visibilité du radar dans cette direction est logiquement réduite.

3. Correction de la sous-capture des précipitations solides et modélisation nivale

La méthodologie présentée au *Chapitre 2* considère la mesure aux pluviomètres comme valeur de référence. Or, cette mesure souffre d'imprécisions, même lorsqu'il s'agit de pluviomètres de haute qualité. Cela est particulièrement vrai lorsque les précipitations tombent sous forme solide. En effet, lorsqu'il neige, les particules sont beaucoup plus sujettes au transport par le vent, ce qui affecte la mesure. Une étude de l'OMM (*Kochendorfer et al., 2017*) a évalué à 34 % la sous-capture des pluviomètres («gauge undercatch», en anglais) sur 8 sites à travers le monde en comparaison avec des pluviomètres protégés par un bouclier contre les effets du vent. Ainsi, ce chapitre explore la correction des valeurs aux pluviomètres avant le calcul d'interpolation spatiale pour ensuite utiliser ces valeurs dans un modèle de neige. L'application de la correction au niveau de la mesure de la station permet de modifier uniquement les valeurs des stations où la précipitation est supposée solide (lorsque la température est inférieure à 2°C dans cette étude). Cela permet une correction plus ciblée que l'application d'un facteur correcteur à l'ensemble d'une grille après interpolation. Dans la présente étude, des valeurs de facteur correcteur de 1,2 et 1,3 ont été explorées. Ainsi, en plus des deux produits d'estimation quantitative des précipitations (QPE) CombiPrecip

de MétéoSuisse, ci-après nommé QPE1, et le produit RCK, présenté au chapitre 2 et ci-après nommé QPE2, deux autres produits ont été calculés, avec respectivement les valeurs de 1,2 (QPE2-120) et 1,3 (QPE2-130). L'analyse se porte sur la période du 1^{er} octobre 2012 au 30 septembre 2018.

Afin de disposer de valeurs de température pour la modélisation, un produit spatialisé de température a également été calculé pour l'ensemble du territoire étudié. Une maille 2D de température est calculée (chaque heure) à partir d'un modèle numérique de terrain transformé en température à l'aide d'une relation non-linéaire température-altitude. Un krigeage avec dérive externe utilisant cette maille 2D est ensuite appliqué.

a. Modélisation de la neige

La modélisation de la quantité de neige est réalisée avec le modèle Snow-SD (*version modifiée du modèle de neige proposé par Schaeffli et al. 2005*), disponible dans le logiciel RS MINERVE (*Foehn et al. 2020; García Hernández et al., 2020*). Ce modèle permet de simuler l'accumulation de neige ainsi que la fonte au travers d'un coefficient de fonte basé sur la température. Le modèle est calibré en utilisant des données satellitaires de couverture neigeuse, le Normalized Difference Snow Index (NDSI) du radiospectromètre MODIS (*Hall et al., 2002*). La donnée satellitaire et la quantité de neige modélisée sont converties en séries binaires de présence/absence de neige en appliquant des seuils spécifiques. Ainsi, le coefficient de fonte de neige est calibré pour reproduire au mieux, avec le modèle, la présence de neige définie par l'observation MODIS. L'indicateur d'Overall Accuracy, optimisant le nombre de cas correct de présence et absence de neige, est utilisé à cette fin (*Parajka and Blöschl, 2008*). Le calage est réalisé pour 11 sites de mesures de l'Institut Suisse pour l'étude de la neige et des avalanches SLF, permettant une validation de l'équivalent en eau de la neige (Snow Water Equivalent, SWE) simulé par le modèle avec des valeurs in situ.

b. Pré-traitement des données

L'équivalent en eau de la neige simulé avec le modèle, après calage, permet une bonne reproduction des valeurs observées pour la plupart des sites étudiés. Cela n'est cependant pas le cas, par exemple, pour le site de mesure d'Egginer (4EG), et dans une moindre mesure de Saas-Fee (4SF), tous deux dans la vallée de Saas. L'analyse des résultats a démontré, qu'à partir de l'hiver 2014–2015, le modèle de neige y

sous-estimait fortement les valeurs observées. Cela correspond au premier hiver après la mise en service du nouveau radar (PPM). Les séries de précipitations du produit radar pour ces deux emplacements, ainsi que pour l'emplacement de la station SMN la plus proche (Saas-Balen) ont ainsi été extraites pour analyse. La *Figure 4* présente la différence en termes de pluies cumulées entre les deux pixels contenant les sites SLF et le pixel contenant la station SMN. Un point de rupture y est évident en juin 2014. Avant cette date, le pixel contenant la station Saas-Balen reporte moins de précipitation que les 2 pixels contenant les sites 4EG et 4SF. Cette tendance est inversée après juin 2014. Une analyse des données du produit radar pour le pixel contenant la station SMN a révélé un gain important en visibilité du produit radar pour le pixel contenant la station SMN. Cela n'est pas le cas au-dessus des deux sites du SLF. Lors de la combinaison radar-stations, la meilleure visibilité au-dessus de Saas-Balen se traduit localement par une moins forte correction positive, alors que les deux pixels contenant les sites 4EG et 4SF nécessiteraient encore une telle correction. Cet exemple illustre bien les difficultés liées à l'intégration de données radar dans l'interpolation des précipitations, cette donnée apportant une information essentielle sur la variabilité spatiale des précipitations, mais présentant également une variabilité spatiale en termes de qualité de l'information. Ces deux emplacements ont été écartés de l'analyse au-delà de juin 2014, tout comme la station Morgins (sur toute la période d'analyse) en lien avec un problème des températures estimées, lié à la présence, une partie de l'hiver, d'un lac d'air froid dans la partie amont du bassin.

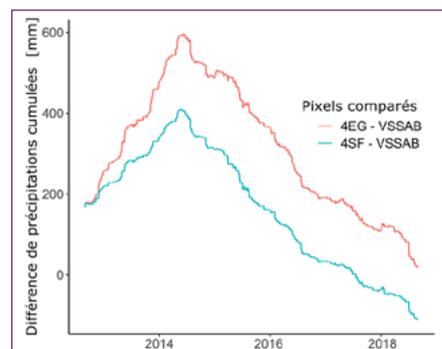


Figure 4: Différence de pluie cumulée (produit radar) entre les pixels contenant les deux sites de mesure du SLF avec les valeurs du pixel contenant la station SMN Saas-Balen. La rupture nette en juin 2014 correspond à la mise en service du radar de la Pointe de la Plaine Morte (PPM).

c. Résultats

Le modèle a été calibré pour les 10 emplacements de mesure du SLF retenus et pour chacun des 4 produits de précipitation. Les valeurs du modèle sont comparées aux observations in situ (Figure 5). Les résultats suggèrent que les valeurs obtenues avec les deux produits QPE1 (CombiPrecip) et QPE2 sous-estiment les valeurs observées (biais négatif), avec des valeurs de régressions linéaires de 0,71 et 0,85. Ces valeurs sont de 1,00 et 1,06 en utilisant respectivement les produits QPE2-120 et QPE2-130, suggérant une forte réduction du problème de biais.

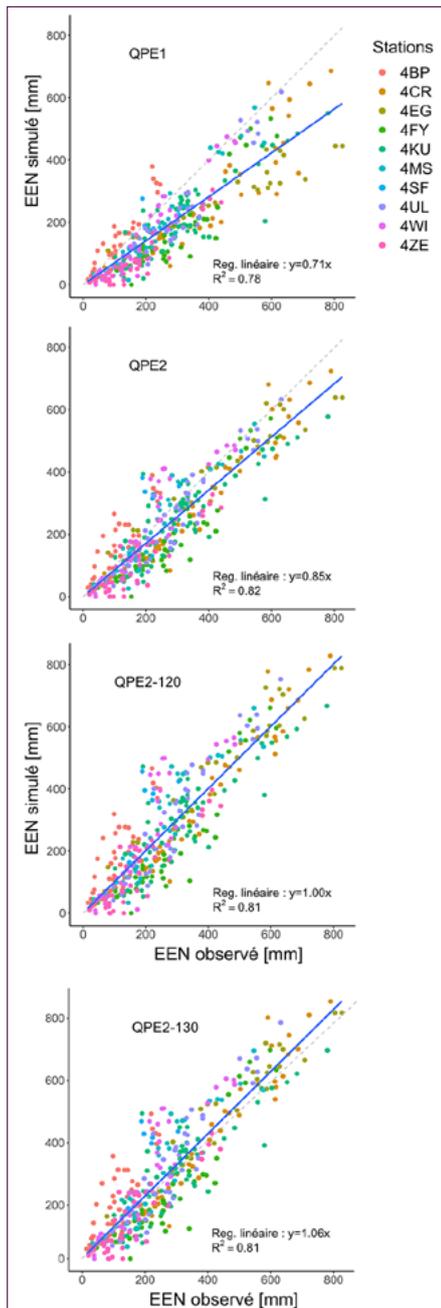


Figure 5: Valeurs d'équivalent en eau de la neige (EEN) simulées par le modèle versus valeurs observées in situ; chaque sous-graphique correspond à un produit de précipitation.

Il est intéressant de noter la différence entre les valeurs obtenues avec les produits QPE1 et QPE2, alors que la donnée d'entrée diffère peu entre les deux cas et que la méthode de calcul est, à priori, également relativement semblable. La Figure 6 présente le même nuage de points que la partie QPE1 de la Figure 5, avec un code de couleur permettant de regrouper les valeurs en fonction de l'existence ou non du radar PPM au moment de la mesure. Cette distinction permet d'illustrer une nette sous-estimation, notamment des valeurs élevées d'équivalent en eau de la neige, avant l'installation du nouveau radar. Une telle différence n'existe pas avec le produit QPE2. Cela s'explique par le fait que le produit QPE1 est calculé pour l'ensemble du territoire national, alors que le produit QPE2 ne l'est qu'au niveau du Valais. Avant l'installation du nouveau radar, le produit radar tendait globalement à fortement sous-estimer la précipitation en Valais. Avec une correction appliquée au niveau Suisse, cette sous-estimation n'est pas véritablement compensée. Avec le produit cantonal QPE2, la correction peut tenir compte du biais négatif sur l'ensemble du bassin étudié, éliminant ce problème de sous-estimation. Cet exemple illustre bien comment un produit non-biaisé sur l'ensemble d'un territoire, car issu d'un krigeage qui est un estimateur non-biaisé, peut présenter localement des biais non négligeables.

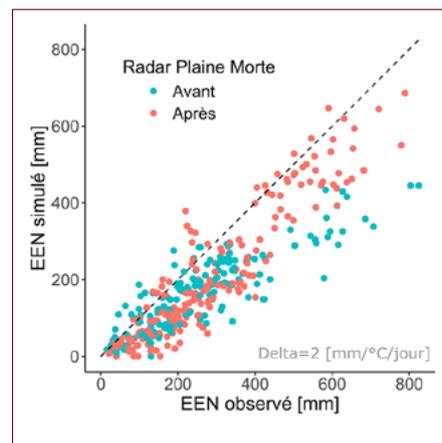


Figure 6: Valeurs d'équivalent en eau de la neige (EEN) observées et simulées avec le produit QPE1 (CombiPrecip). Le code de couleur distingue les points en fonction du moment de la mesure par rapport à l'installation du radar de la Pointe de la Plaine Morte (PPM).

Finalement, l'erreur moyenne absolue a été calculée pour chacun des quatre produits de précipitation. La plus faible erreur ayant été obtenue avec le produit QPE2-120, ce

produit a été retenu pour la suite de l'étude comme variante avec correction des précipitations solides.

L'intégration de coefficients correcteurs a permis de réduire la sous-estimation par un modèle de neige des valeurs mesurées in situ. Cependant, l'approche proposée considère des coefficients fixes et uniques pour toutes les stations. De futurs développements de la méthodologie devraient considérer la vitesse du vent au moment de la mesure au travers de «fonctions de transfert» (Kochendorfer et al., 2017) pour obtenir une correction plus adéquate et plus performante.

4. Modélisation hydrologique

Dans une perspective de prévision de crues pour l'ensemble du bassin, l'approche du calage basé sur MODIS a été appliquée sur trois bassins équipés de stations hydrométriques de l'Office Fédéral de l'Environnement (la Grande-Eau à l'amont d'Aigle, la Lonza à l'amont de Ferden et la Saltina à l'amont de Brig). Les modèles hydrologiques SOCONT et GSM (Schaeffli et al., 2005; Hamdi et al., 2005) sont utilisés respectivement pour la modélisation des parties non-glaciaires et glaciaires. Le calage est réalisé en deux phases: dans un premier temps, les coefficients degré-jour de fonte nivale sont déterminés pour tous les pixels avant d'être agrégés sur les entités spatiales du modèle semi-distribué (bandes d'altitude d'environ 400 mètres d'altitude); dans un second temps, les autres paramètres du modèle hydrologique sont calibrés sur la base de données de débit. En parallèle, le modèle est également calibré avec une approche conventionnelle basée uniquement sur les données de débit.

De plus, les performances hydrologiques sont comparées en calant le modèle avec différents produits de précipitation. D'une part, deux jeux de données sont constitués de valeurs aux pluviomètres: (I) le réseau SMN et (II) le réseau SMN couplé au réseau MG (sans distinction). D'autre part, trois produits spatialisés sont considérés: (I) le produit CombiPrecip de Météo-Suisse (QPE1); (II) le produit QPE2 calculé avec la méthode RCK présentée au Chapitre 2; (III) le produit QPE2-120 présenté dans le Chapitre 3.

Le calage est réalisé sur la période 2014–2018 et la validation sur la période 2012–2014. Cette division tient compte de l'installation du radar PPM en juin 2014. Le calage hydrologique est réalisé avec l'indicateur de performance Kling-Gupta Efficiency (Kling et al., 2012).

a. Différence de cumul de précipitation

Avant intégration dans le modèle hydrologique des différents produits de précipitation, les cumuls par produit sur chaque bassin ont été comparés. Considérant le jeu de données avec le réseau SMN comme référence (100 %), l'intégration des stations MeteoGroup (jeu de données SMN + MG) confirme l'introduction d'un biais négatif avec des valeurs de cumuls variant entre 92,1 % et 97,1 % de SMN (en considérant indépendamment les 3 bassins et les périodes de calage et de validation). Pour les produits spatialisés, il est à nouveau intéressant de comparer les valeurs entre QPE1 (CombiPrecip) et QPE2. Sur la période de calage (correspondant à la période après l'installation du radar PPM), les cumuls diffèrent peu entre les deux produits avec 103 et 107 % respectivement pour QPE1 et QPE2 sur le bassin de Saltina, 92 et 90 % pour Lonza et 89 et 89 % pour Grande-Eau. Il en est autrement sur la période de validation, avec respectivement 100 et 126 % pour Saltina, 97 et 120 % pour Lonza et 84 et 105 % pour Grande-Eau. Les valeurs bien supérieures de QPE2 par rapport à QPE1 s'expliquent de la même manière que pour l'observation réalisée sur la Figure 6, avec une correction de la sous-estimation du radar sur le bassin plus importante lors d'une correction locale (QPE2) par rapport à une correction réalisée sur l'ensemble de la Suisse (QPE1).

b. Résultats

Le modèle hydrologique des trois bassins a été calibré considérant les différents

jeux de données d'entrée et les deux approches de calage (conventionnelle et en 2 phases).

Du point de vue du calage du modèle de neige, la Figure 7 illustre les valeurs obtenues par pixel sur le bassin de la Grande-Eau. Il est observable que les pentes orientées sud tendent à présenter des valeurs légèrement supérieures aux pentes orientées nord. Les valeurs aux pixels sont ensuite agrégées par bande d'altitude pour fournir les valeurs utilisées dans le modèle.

D'un point de vue hydrologique, le calage en deux phases n'a pas permis de véritablement améliorer les performances par rapport au calage conventionnel, du moins pour la période de calage. Sur la période de validation, certains des indicateurs de performance ont obtenu leur meilleure valeur pour des configurations considérant le calage en deux phases. Pour le bassin de la Saltina, avec la meilleure visibilité radar parmi les trois bassins étudiés, les meilleures performances sont obtenues avec le produit QPE2-120. Dans le cas de la Lonza, avec une visibilité légèrement moins bonne, le produit QPE2-120 est égalé par le jeu de données des valeurs SMN. Pour le moins bon scénario de visibilité étudié (Grande-Eau), les meilleures performances sont obtenues avec le jeu de données des valeurs SMN. L'intérêt d'un produit spatialisé basé sur l'image radar semble donc dépendre de la qualité du produit radar avant correction. De futures améliorations du produit radar semblent donc encore nécessaires avant de pouvoir obtenir un produit spatialisé de

précipitation de haute qualité pour l'ensemble du territoire.

L'analyse réalisée dans ce chapitre n'a pas permis d'identifier un produit de précipitation menant aux meilleures performances pour l'ensemble des trois bassins étudiés, celle-ci dépendant de la qualité du produit radar sur chaque bassin. En outre, le calage en deux phases n'a pas permis de surpasser en performance un calage conventionnel. L'utilisation d'un indicateur de performance plus complexe, ainsi qu'un meilleur filtrage selon la performance des pixels retenus pour l'agrégation ont été identifiés comme développement futurs.

5. Assimilation de données

La dernière partie du projet avait pour objectif d'élaborer et d'implémenter une méthodologie d'assimilation de données de débit afin d'améliorer la qualité des prévisions hydrologiques. Le but est d'améliorer les conditions initiales utilisées pour la prévision afin qu'elles soient le plus adéquates possibles. Le système MINERVE dispose déjà d'une routine adaptant la saturation en eau du sol du modèle sur la base d'une comparaison entre volume simulé et volume observé sur les 24 heures précédant la prévision (Jordan, 2007). L'objectif est de proposer une méthode plus élaborée en adaptant, non seulement la saturation du sol, mais plus largement les variables d'état les plus pertinentes. Pour ce faire, le choix s'est porté sur l'implémentation d'un filtre de Kalman d'ensemble (Evensen, 1994). La méthode est

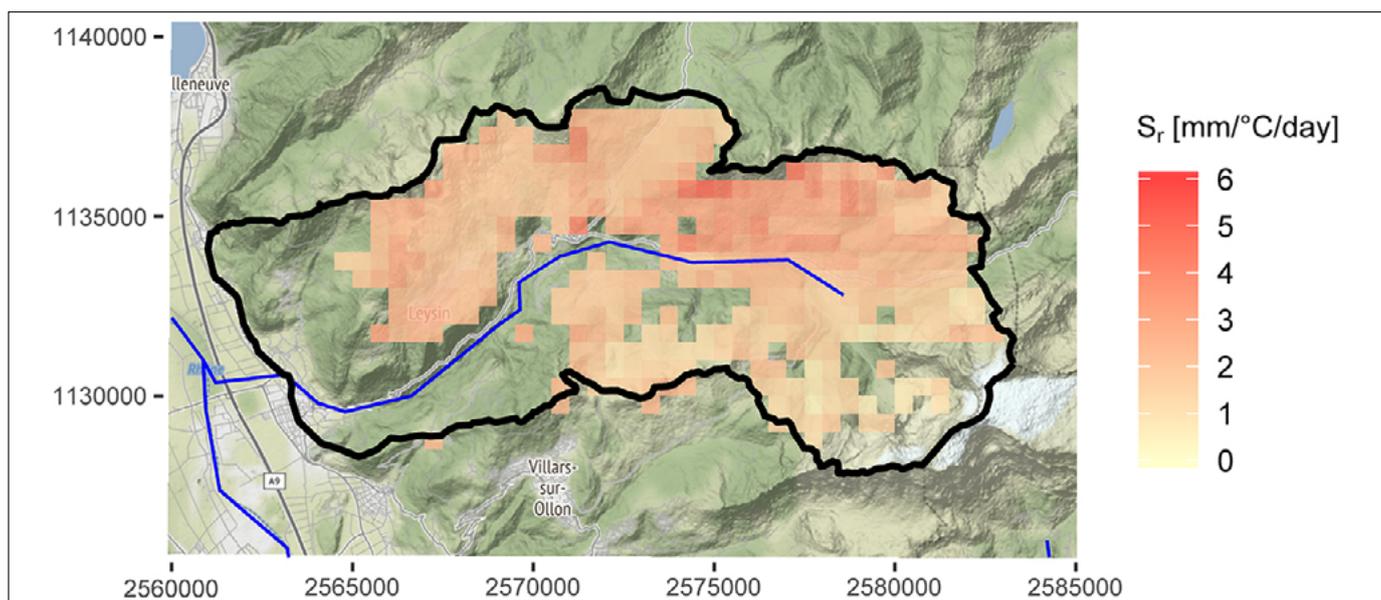


Figure 7: Valeur du coefficient degré-jour S_r obtenues pour le bassin de la Grande-Eau. Seules les valeurs de pixels ayant obtenu une valeur d'Overall Accuracy supérieure à un seuil dépendant de l'enneigement annuel du pixel sont affichées. Image d'arrière-plan: map tiles by Stamen Design, under CC BY 3.0. Data by OpenStreetMap, under ODbL.

basée sur une approche ensembliste, c'est-à-dire qu'un certain nombre d'itérations du modèle sont simulées en parallèle, ce qui permet d'obtenir un échantillon des valeurs possibles des variables d'état. Une analyse de covariance permet ensuite de corriger les membres sur la base d'une pondération des erreurs du modèle et des erreurs associées aux observations. Pour assurer une certaine divergence entre les membres, les données d'entrée sont perturbées. Pour les précipitations, cette perturbation est multiplicative et suit une distribution log-normale avec une médiane à 1, alors que pour les températures, elle est additive et suit une distribution normale centrée en 0. En outre, les observations de débit sont également perturbées, ce qui permet de considérer l'incertitude dans la donnée d'observation. Finalement, les conditions initiales lors de la première itération sont distribuées selon une distribution normale, afin de générer une distribution initiale des membres.

La méthodologie a été implémentée dans le langage et environnement R (*R Core team, 2018*) pour interagir avec le logiciel RS MINERVE (*Foehn et al., 2020; García Hernández et al., 2020*). La méthodologie a été appliquée sur deux événements récents de fortes précipitations, l'un en juin 2019 sur le bassin du Rhône à l'amont de la station hydrométrique de Reckingen, l'autre en mai 2015 sur le bassin de la Grande-Eau à l'amont d'Aigle.

Dans les résultats, trois scénarios sont présentés: Control correspond au scénario de référence sans aucune mise à jour du modèle; VBU (Volume Based Update) correspond à la mise à jour opérationnelle basée sur le volume des 24 dernières heures; EnKF (Ensemble Kalman Filter) correspond à la nouvelle méthode implémentée.

Pour l'évaluation de l'erreur, la Root-Mean-Square Error (RMSE) pour chaque heure de prévision, moyennée sur toutes les prévisions, est calculée.

a. Résultats

La *Figure 8* présente un exemple de prévision hydrologique pour 72 heures selon les différentes approches de mise à jour. La correction par la méthode EnKF y est relativement importante, avec un décrochement marqué de la courbe entre la phase d'assimilation et celle de prévision.

Du point de vue des performances globales sur l'événement, EnKF-median fournit la valeur de RMSE la plus faible sur tout l'horizon de prévision (*Figure 9*). Cela est particulièrement vrai pour les premières heures de prévision, la correction

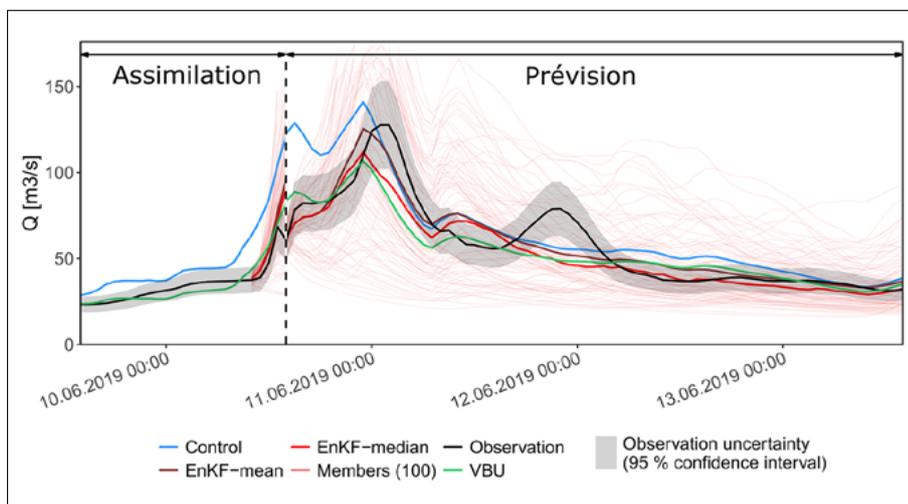


Figure 8: Prévisions hydrologiques pour le Rhône à la station de Reckingen selon les trois différentes approches. Le traitillé vertical correspond au 10-06-2019T14:00+01:00. Les traits roses (légers) correspondent aux 100 membres. La zone grise autour du débit observé correspond à l'intervalle de confiance de 95 % selon l'incertitude attribuée aux données de débit.

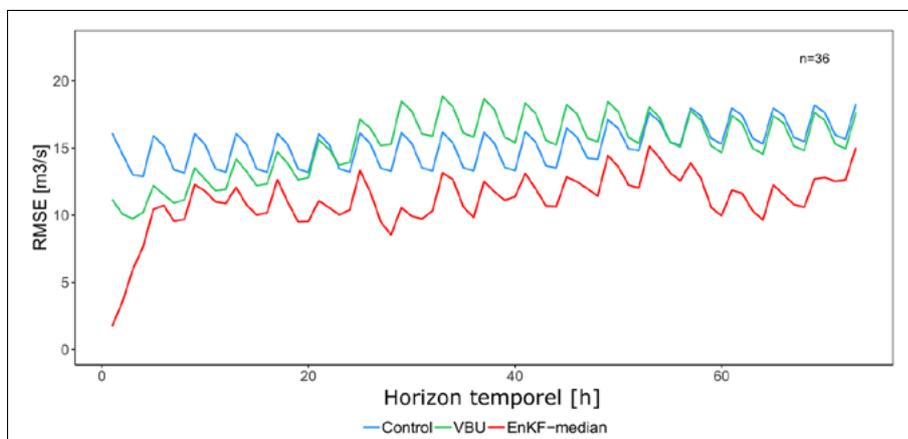


Figure 9: Valeurs de RMSE obtenues pour les trois approches sur l'ensemble de l'événement de juin 2019 sur le Rhône à Reckingen (moyenne sur 36 prévisions).

étant réalisée sur la base de la dernière observation disponible et celle-ci modifiant par exemple également le débit dans les tronçons de rivières du modèle (effet limité dans le temps).

Afin d'évaluer la performance également sur le débit de base (sans crue), la même analyse a été réalisée sur les 4 jours précédant la crue. Dans ce cas, l'EnKF fournit toujours les meilleures performances sur la première journée de prévision. Pour des horizons de prévision supérieurs, l'erreur tend cependant à être plus élevée qu'avec les deux autres approches. Avec des cycles de débit journaliers marqués et une analyse de l'EnKF basé uniquement sur la dernière valeur de débit disponible, des décalages temporels, même faibles, du débit simulé peuvent se traduire par des adaptations des variables d'état inadéquates. Par conséquent, l'application d'une méthode d'assimilation de données tel qu'un filtre de Kalman d'en-

semble requiert un bon calage du modèle autant pour les faibles que les hauts débits.

Dans le cas de la crue de mai 2015 sur la Grande-Eau, un autre problème a pu être mis en évidence. En effet, la Grande-Eau reçoit les eaux d'un réservoir situé à l'extérieur du bassin hydrologique, dont les données ne sont pas disponibles pour la modélisation. Cette contribution, qui peut dépasser 50 % du débit de base naturel, impacte directement les performances des deux méthodes d'assimilation de données (VBU et EnKF) en menant à une forte surestimation de la crue à cause d'une hausse artificielle de la saturation en eau du sol. Cet exemple illustre l'importance de disposer des valeurs des apports et des prélèvements au cours d'eau avant de pouvoir implémenter une méthode tel qu'un filtre de Kalman d'ensemble dans des bassins perturbés par des activités hydroélectriques.

6. Conclusions

La prévision hydrologique en milieu alpin reste un défi important malgré l'amélioration continue des données à disposition. Le projet de doctorat présenté ci-dessus a notamment permis l'élaboration d'une méthodologie de spatialisation des précipitations incluant une correction pour les précipitations solides avant interpolation. Cela constitue une première étape vers un développement futur intégrant également des vitesses du vent pour une correction plus fine des précipitations solides.

Les résultats présentés suggèrent que d'un point de vue hydrologique, l'intégration de données radar dans la donnée de précipitation apporte une plus-value à condition que la visibilité du radar sur le bassin étudié

soit suffisamment bonne. Les estimations radar doivent encore être améliorées avant que les produits spatialisés de précipitation combinant radar et valeurs de stations ne puissent être considérés comme une alternative sur l'ensemble du territoire à l'interpolation uniquement des valeurs aux stations. De plus, avec un nombre croissant de sources de données disponibles, le choix de la meilleure combinaison implique une analyse comparative approfondie. En outre, le calage en deux phases avec estimation des paramètres de fonte de neige à l'aide de données satellitaires a permis d'améliorer le calcul de la couverture de neige, mais, pour ce qui concerne le calcul du débit, n'a pas permis de surpasser en performance un calage conventionnel basé uniquement sur des données de débit.

L'implémentation d'un filtre de Kalman d'ensemble fournissant des résultats prometteurs a également montré l'importance d'un bon calage pour les débits, à la fois faibles et élevés, ainsi que celle de l'accès aux données de turbinage pour un système de prévision des crues, sans quoi, des méthodes avancées, telle que filtre de Kalman d'ensemble, ne semblent pas être des solutions adaptées.

Remerciements

Les présents résultats sont issus d'un projet de recherche financé par le Centre de recherche sur l'environnement alpin (CREALP) et l'Office Fédéral de l'Energie, Programme de recherche Force hydraulique.

Références:

- Andres, N., Badoux, A. (2019). Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2018 - Rutschungen, Murgänge, Hochwasser und Sturzereignisse. *Wasser Energie Luft*, 111. Jahrgang (Heft 1).
- Erđin, R., Frei, C., Künsch, H. R. (2012). Data transformation and uncertainty in geostatistical combination of radar and rain gauges. *Journal of Hydrometeorology*, 13(4):1332–1346. doi: 10.1175/JHM-D-11-096.1.
- Evensen, G. (1994). Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *Journal of Geophysical Research*, 99:10143. ISSN 0148-0227. doi: 10.1029/94JC00572.
- Foehn, A., García Hernández, J., Schaeffli, B., De Cesare, G. (2018). Spatial interpolation of precipitation from multiple rain gauge networks and weather radar data for operational applications in Alpine catchments. *Journal of Hydrology*, 563:1092–1110. ISSN 00221694. doi:10.1016/j.jhydrol.2018.05.027.
- Foehn, A. (2019). Radar-rain gauge merging and discharge data assimilation for food forecasting in Alpine catchments. PhD Thesis N° 9777, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne.
- Foehn, A., García Hernández, J., Roquier, B., Fluixá-Sanmartín, J., Paredes Arquiola, J., De Cesare, G. (2020). RSMINERVE – User manual, v2.15. Ed. CREALP, Switzerland. ISSN 2673-2653.
- García Hernández, J. (2011). Flood management in a complex river basin with a real-time decision support system based on hydrological forecasts. Communication 48 du Laboratoire de Constructions Hydrauliques. Ed. A. Schleiss, EPFL, Lausanne.
- García Hernández, J., Foehn, A., Fluixá-Sanmartín, J., Roquier, B., Paredes Arquiola, J., De Cesare, G. (2020). RSMINERVE – Technical manual, v2.25. Ed. CREALP, Switzerland. ISSN 2673-2661.
- Häll, D. K., Riggs, G. A., Salomonson, V. V., DiGirolamo, N. E., Bayr, K. J. (2002). MODIS snow-cover products. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2):181–194. ISSN 00344257. doi: 10.1016/S0034-4257(02)00095-0.
- Hamdi, Y., Hingray, B., Musy, A. (2005). Un modèle de prévision hydro-météorologique pour les crues du Rhône supérieur en Suisse. *Eau, énergie, air*, 97(11):325–332.
- Hingray, B., Schaeffli, B., Mezghani, A., Hamdi, Y. (2010). Signature-based model calibration for hydrological prediction in mesoscale Alpine catchments. *Hydrological Sciences Journal*, vol. 55, no 6, p. 1002-1016. doi: 10.1080/02626667.2010.505572.
- Jordan, F. (2007). Modèle de prévision et de gestion des crues: optimisation des opérations des aménagements hydroélectriques à accumulation pour la réduction des débits de crue. Communication 29 du Laboratoire de Constructions Hydrauliques. Ed. A. Schleiss, EPFL, Lausanne.
- Kling, H., Fuchs, M., Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424-425:264–277. ISSN 00221694. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.01.011.
- Kochendorfer, J., Nitu, R., Wolff, M., Mekis, E., Rasmussen, R., Baker, B., Earle, M. E., Reverdin, A., Wong, K., Smith, C. D., Yang, D., Roulet, Y.-A., Buisan, S., Laine, T., Lee, G., Aceituno, J. L. C., Alastrué, J., Isaksen, K., Meyers, T., Brækkan, R., Landolt, S., Jachcik, A., Poikonen, A. (2017). Analysis of single-Alter-shielded and unshielded measurements of mixed and solid precipitation from WMO-SPICE. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(7):3525–3542. ISSN 1607-7938. doi: 10.5194/hess-21-3525-2017.
- ÖFEG (2002). Hochwasser 2000 – Les crues 2000. Rapports de l'ÖFEG, Série Eaux, Nr. 2, Office Fédéral des Eaux et de la Géologie.
- Parajka, J., Blöschl, G. (2008). Spatio-temporal combination of MODIS images - potential for snow cover mapping. *Water Resources Research*, 44(3). ISSN 00431397. doi: 10.1029/2007WR006204.
- R Core Team (2018). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0. URL <https://www.R-project.org>.
- Schaeffli, B., Hingray, B., Niggli, M., Musy, A. (2005). A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9(1/2):95–109. ISSN 1607-7938. doi: 10.5194/hess-9-95-2005.
- Sideris, I. V., Gabella, M., Erđin, R., Germann, U. (2014). Real-time radar-rain-gauge merging using spatio-temporal co-kriging with external drift in the alpine terrain of Switzerland. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140(680):1097–1111. doi: 10.1002/qj.2188.
- Tobin, C. (2012). Improving Alpine flood prediction through hydrological process characterization and uncertainty analysis. PhD Thesis N° 5416, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne.
- Vuerich, E., Monesi, C., Lanza, L., Stagi, L., Lanzinger, E. (2009). WMO Field intercomparison of rainfall intensity gauges. Instruments and observing methods Report no. 99, World Meteorological Organization, Vigna di Valle, Italy.

Auteurs:

Alain Foehn^{1,2}, Javier García Hernández², Giovanni De Cesare¹, Andrea Rinaldo³, Bettina Schaeffli⁴, Anton J. Schleiss¹

¹ Plateforme de Constructions Hydrauliques (PL-LCH), Faculté ENAC, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

² Centre de recherche sur l'environnement alpin (CREALP)

³ Laboratoire d'écohydrologie (ECHO), Faculté ENAC, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

⁴ Institut des dynamiques de la surface terrestre (IDYST), Université de Lausanne (UNIL). Maintenant à l'Institut de Géographie, Université de Berne.

Contact:

Alain Foehn, EPFL; alain.foehn@alumni.epfl.ch