

Prototype de ré-analyses pluviométriques pour la région Cévennes-Vivarais en 2008

Guy Delrieu, Brice Boudevillain, Annette Wijbrans, Dominique Faure, Laurent Bonnifait, Pierre-Emmanuel Kirstetter, Audrey Confoland

Laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement, CNRS / Université de Grenoble / IRD, Grenoble, France

Résumé

Après une brève présentation des activités de l'observatoire, cet article décrit une méthodologie d'estimation des précipitations s'appuyant sur les données pluviographiques et radar opérationnelles de la région Cévennes-Vivarais. Appliquée à l'année 2008, cette approche est destinée à la production de ré-analyses pluviométriques de longue durée pour des applications hydrologiques. La mosaïque radar et le réseau pluviographique sont « mis en compétition » par l'application de trois méthodes d'estimation reposant sur chaque système d'observation séparément et sur leur fusion. On montre que l'apport du radar n'est effectif que pour les épisodes pluvieux pour lesquels l'isotherme 0 °C est à une altitude supérieure à 2000 m. Pour les épisodes d'été et d'automne, qui sont ceux conduisant aux phénomènes de crues marquées dans la région, le radar apporte une indéniable plus-value et la fusion radar-pluviographes par krigage avec dérive externe permet de combiner efficacement les qualités des deux systèmes d'observation (résolution spatio-temporelle du radar et mesure directe des pluviographes). Pour ces épisodes, le gain apporté par le radar est d'autant plus marqué que les échelles spatiales et temporelles sont fines. La quantification des erreurs d'estimation est un aspect fondamental de ce travail, abordé dans le cadre de la géostatistique.

L'observatoire hydrométéorologique méditerranéen Cévennes-Vivarais

L'Observatoire hydrométéorologique méditerranéen Cévennes-Vivarais (OHM-CV ; <http://www.ohmcv.fr>) est un service d'observation de l'Institut national des sciences de l'univers (Insu) porté par le LTHE au sein de l'Observatoire des sciences de l'univers de Grenoble (Osug). Il associe un ensemble d'équipes de recherche françaises appartenant à divers organismes (CNRS, Ifsttar, Irstea, École des Mines d'Alès, Météo-France, universités de Grenoble, Montpellier, Nice et Toulouse) sur la thématique de l'observation et de la modélisation des phénomènes de pluies intenses et de crues à dynamique rapide en région méditerranéenne.

Fondé en 2000, l'observatoire développe une stratégie d'observation s'appuyant sur trois axes :

1. L'observation détaillée des processus hydrométéorologiques et hydrologiques sur une « fenêtre » spatiale de 32 000 km² incluant les principaux bassins versants cévenols (figure 1). Cette région, du fait de sa susceptibilité aux pluies intenses, bénéficie de précieux systèmes d'observation opérationnels. Les équipes de recherche de l'OHM-CV complètent ces observations opérationnelles au moyen de dispositifs dédiés à une meilleure caractérisation des pluies (disdromètres, radars de recherche, GPS) et des processus hydrologiques, sur un ensemble de bassins versants de recherche échantillonnant divers paysages méditerranéens. Les objectifs de ces observations

sont : de développer des techniques d'observation innovantes, de permettre l'évaluation des modèles météorologiques et hydrologiques existants et de soutenir le développement de modèles de future génération. Un effort particulier de développement des observations de recherche est en cours dans le cadre des périodes d'observations intensives du projet HyMeX (Drobinski et al., 2013 ; Ducrocq et al., 2013) dont l'OHM-CV est l'un des piliers. Le projet Flood-Scale (<http://floodscale.irstea.fr/>) vise à développer la synergie observation-modélisation sur une gamme d'échelles spatiales allant du bassin versant à la région. On notera également que des observations sociologiques sont réalisées dans le Gard, par exemple sur la mobilité des populations lors de ces phénomènes extrêmes ou sur le fonctionnement des systèmes d'alerte.

2. La réalisation de retours d'expérience « météo-hydrosociologiques » suite à des événements extrêmes là où ils se produisent et non pas seulement au sein de la fenêtre d'étude de l'observatoire. Il s'agit de développer et de mettre en œuvre des techniques d'observation de post-crise afin de documenter les événements majeurs pour mieux caractériser les processus dominants et faire la part entre les composantes aléas et vulnérabilité du risque hydrométéorologique dans différents contextes socio-économiques. Cette stratégie d'observation pluridisciplinaire est développée en partenariat avec les services opérationnels, des équipes de recherche françaises et étrangères ainsi que des filières d'enseignement universitaire. Elle implique des chercheurs et praticiens de divers horizons et contribue ainsi grandement à la diffusion des savoir-faire et des bonnes pratiques.

...

Abstract

A prototype method of reanalysis of rainfall data in Cévennes-Vivarais for 2008

This article describes a method of estimating rainfall based on raingauge and radar data available from operational networks in the Cévennes-Vivarais region, France. Applied to the year 2008, this approach is intended to produce long-term rainfall reanalyses for hydrological applications. The radar mosaic and the raingauge network are "in competition" with the application of three estimation methods based on each observation system separately, and their fusion. We show that the contribution of the radar is effective only for the rainy periods for which the 0 °C isotherm is above 2000 m. For summer and fall events, which are those leading to the most remarkable floods in the region, the radar provides undeniable added value. Data merging by kriging with external drift can effectively combine the qualities of the two observation systems (spatial and temporal resolution of the radar and direct measurements of raingauges). For these episodes, the gain provided by the radar is more pronounced for the smallest spatial and temporal scales. The quantification of estimation errors is a fundamental aspect of this work, discussed in the context of geostatistics.

3. L'utilisation d'observations plus anciennes portant sur la période d'observation « systématique » (depuis le début des années 1960), complétées par l'archive historique voire par des données paléohydrologiques, vise enfin à disposer de longues séries d'observation. Celles-ci présentent un intérêt évident pour le dimensionnement d'ouvrages et d'infrastructures ainsi que pour des études climatiques et notamment pour la caractérisation de l'évolution des événements extrêmes dans le contexte du changement global en Méditerranée (réchauffement avéré et pression anthropique accrue). Ainsi le projet ExtraFlo (<http://extraflo.irstea.fr>) a-t-il permis de procéder à une inter-comparaison des principales méthodes de prédétermination des pluies et crues extrêmes utilisées en France de façon à mieux connaître leurs domaines respectifs d'application. De plus, la question de la modélisation des pluies extrêmes en contexte non stationnaire a pu être abordée.

Après cette brève revue des activités de l'OHM-CV (les références des publications sont disponibles sur le site web de l'observatoire), les sections suivantes présentent l'une des actions de long terme de l'observatoire, dédiée à l'établissement de ré-analyses pluviométriques s'appuyant sur les données radar et pluviométriques collectées depuis 2000 en région cévenole. Ce projet est mené en synergie avec Météo-France (Direction de la climatologie, Direction des systèmes d'observation) qui vise également à exploiter au mieux les informations radar collectées par le réseau Aramis pour établir de telles ré-analyses à l'échelle du territoire national (voir en particulier le projet Comephore, Tabary et al., 2012).

Principe et méthodes

La figure 1 présente le système d'observation des précipitations disponible dans la région Cévennes-Vivarais. Il comporte environ 250 pluviographes ayant une résolution temporelle de 1 h, complétés par 160 pluviomètres journaliers. Ces appareils sont gérés par trois organismes : Météo-France, le Service de prévision des crues du grand delta et Électricité de France. Quatre radars météorologiques du réseau Aramis de Météo-France couvrent actuellement la région d'intérêt : les radars **bande S** de Nîmes-Manduel et Bollène, installés dans la vallée du Rhône, couvrent efficacement la partie aval des bassins céve-

nols. Ils sont situés à 65 km l'un de l'autre, ce qui est la distance la plus courte entre radars au sein du réseau Aramis. Le choix de la longueur d'onde (~10 cm) a été dicté par la très forte intensité des précipitations en région méditerranéenne, susceptible de générer des phénomènes d'atténuation significatifs pour des longueurs d'onde plus courtes. Notons qu'en contrepartie cette longueur d'onde est plus sensible aux échos parasites (relief, structures anthropiques), ce qui en constitue une limitation importante dans le contexte de cette étude (Delrieu et al., 2009). Les radars **bande C** (longueur d'onde de ~5 cm) de Sembadel et de Montclar (ce dernier a été installé plus récemment en 2005) complètent la couverture, en particulier pour la partie montagneuse de la fenêtre de l'observatoire. En termes de traitement des données radar, il importe de noter la mise en service opérationnelle d'un nouvel algorithme de calcul des **lames d'eau** en 2007 (Tabary, 2007 ; Tabary et al., 2007), ce qui introduit une rupture de fait dans la série temporelle disponible, en plus de celles liées à l'évolution du nombre de radars et/ou de leurs protocoles d'exploitation, voire à d'éventuelles indisponibilités momentanées des capteurs.

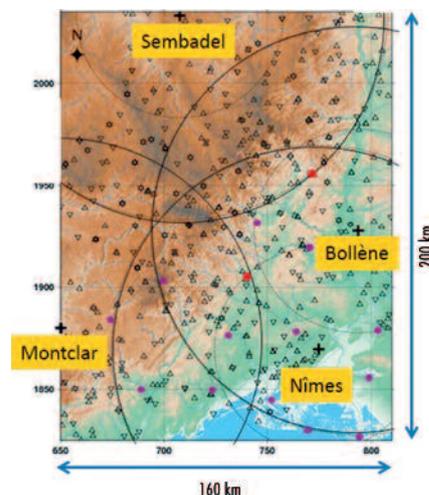


Figure 1. Fenêtre d'observation de l'OHM-CV. Le système d'observation opérationnel des pluies est représenté : pluviographes (Δ), pluviomètres (\square), radars (+ et marqueurs de distance à 50 et 100 km). Par ailleurs, les carrés rouges et les ronds violets indiquent la position de capteurs complémentaires (disdromètres, GPS météorologiques) non utilisés dans le cadre de cette étude.

Concernant la résolution spatiale et temporelle des mesures disponibles, nous pouvons avancer les éléments suivants. Lebel et al. (1987) ont montré que la distance de décorrélation d (en km) des mesures pluviométriques en région cévenole dépendait de la durée de cumul T (en h) par une relation de type puissance :

$$d = 25T^{0.3} \quad (1)$$

dans une gamme de valeurs de T comprises entre 1 et 24 h. La figure 2 montre par ailleurs l'évolution du temps de montée au pic de crue en fonction de la taille du bassin versant pour un ensemble de bassins du sud-est de la France (bassins urbains de la ville de Marseille, bassins cévenols, principaux affluents du Rhône et Rhône lui-même), ainsi que de quelques bassins versants italiens situés en zone de haute montagne. Berne et al. (2004) ont proposé une méthode de caractérisation des résolutions spatiale et temporelle requises en fonction de la taille du bassin versant considéré. L'idée générale est qu'un échantillonnage temporel correct de la crue impose une résolution temporelle égale à une fraction du temps de montée au pic (1/4 par exemple...); la résolution spatiale se déduira de cette résolution temporelle en considérant également une fraction de la distance de décorrélation spatiale des mesures de pluie déduite d'une relation telle que (1). Pour donner un exemple, un bassin versant de 100 km² a des temps de montée au pic compris en 60 et 200 min (figure 2), auxquels correspondent des résolutions temporelles requises de 15 à 50 min (si l'on considère une fraction d'1/4) et des résolutions spatiales de 4 à 6 km (si l'on extrapole la relation (1) aux pas de temps infra-horaires et si l'on considère la même fraction d'1/4). Avec sa densité moyenne d'un appareil pour 128 km² (soit une interdistance de 11 km), on voit que le réseau pluviographique horaire est notablement insuffisant pour fournir des mesures adaptées à l'étude des crues sur les petits bassins versants. Les caractéristiques d'échantillonnage du radar (1 km², 5 min) constituent un « plus » indéniable par rapport au réseau pluviographique pour cet objectif. Avec son interdistance moyenne de 8,8 km pour une distance de décorrélation de 64 km², le réseau pluviométrique complet (410 stations) est toutefois susceptible de fournir des estimations de pluie de très bonne qualité au pas de temps journalier.

Compte tenu de ces éléments, nous avons décidé que les ré-analyses seraient constituées de deux types de produits :

1. Des cartes de cumuls de pluie journalière établies pour chaque jour de l'année avec une résolution spatiale de 1 km². La méthode d'interpolation retenue est le krigeage ordinaire (KO par la suite) avec prise en compte d'un variogramme anisotrope.

2. Des cartes (résolution spatiale : 1 km²) et estimations spatialisées (5 à 500 km²) au pas de temps infrajournalier établies pour une sélection des journées

pluvieuses les plus intenses. Les estimations spatialisées concernent un découpage des principaux bassins cévenols en « mailles hydrologiques » (sous-bassins versants) de taille sensiblement homogène, dans la gamme de 5 à 500 km². Trois produits sont élaborés :

- estimations issues des données des radars météorologiques seuls à un pas de temps supérieur ou égal à 5 min (Rad ci-après). Les données radar considérées sont issues de la mosaïque radar de Météo-France qui combine les données des radars disponibles. Au plan des traitements de données complémentaires, nous avons simplement effectué la projection de cette mosaïque sur la fenêtre OHM-CV ; puis nous avons détecté et corrigé d'éventuelles zones de cumuls anormalement forts pouvant correspondre à des phénomènes parasites (échos de sol, cibles anthropiques diverses...) mal corrigés par les algorithmes de traitement opérationnels ; nous avons enfin optimisé une loi Z-R « effective » pour chaque épisode pluvieux à l'aide des mesures pluviométriques quotidiennes selon l'approche proposée par Bouil-loud et al. (2010). Il s'agit essentiellement, dans cette dernière phase, de corriger des

biais éventuels résultant d'un mauvais choix de relation Z-R et/ou de problèmes d'étalonnage électronique du radar et de garantir (dans une certaine mesure) que les estimations radar au pas de temps journalier seront cohérentes avec les estimations du réseau pluviométrique complet ;

- estimations issues du réseau pluviographique seul au pas de temps horaire par krigeage ordinaire avec prise en compte d'un variogramme climatologique (Clim ci-après) issu de la relation (1) ou d'un variogramme anisotrope déduit de l'imagerie radar (Ani ci-après) ; – estimations par fusion des données pluviographiques et radar au pas de temps horaire par la technique de krigeage avec dérive externe (KED ci-après). Parmi les différentes techniques de fusion, le KED s'est avéré le plus performant dans diverses études d'estimation de pluie par radar et pluviomètres ces dernières années (Velasco-Forero et al., 2009 ; Goudenhoufdt et Delobbe, 2009 ; Erdin et al., 2012). Nous ne détaillerons pas la mise en œuvre pratique de la méthode qui est décrite de façon très complète dans Delrieu et al. (2013a).

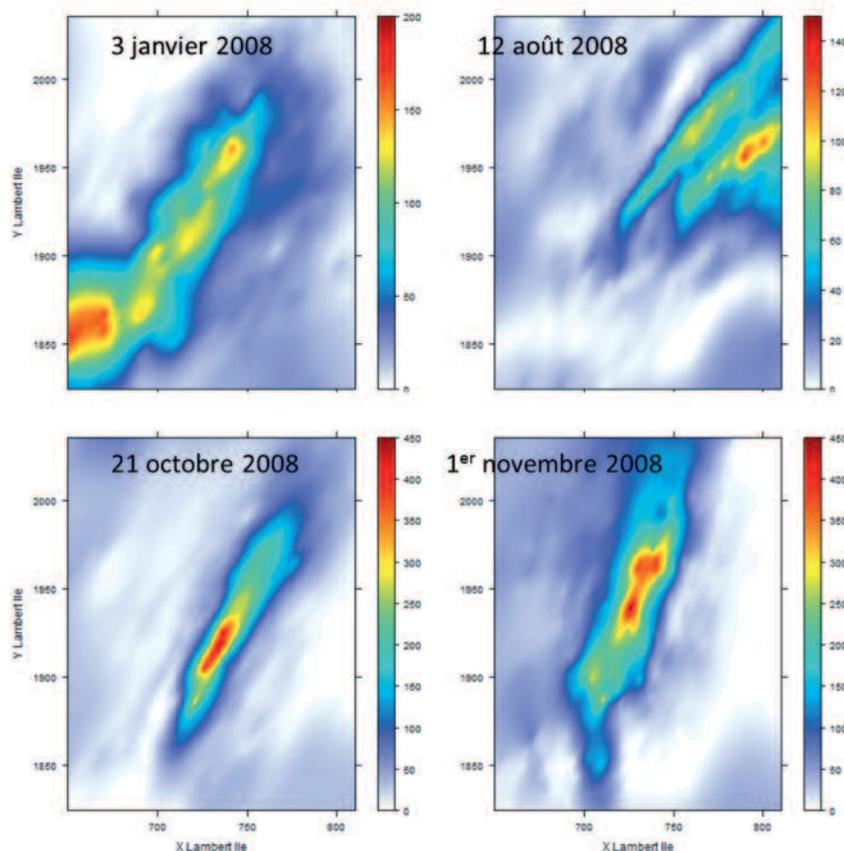


Figure 2. Temps de montée au pic de crue en fonction de la surface du bassin versant pour un ensemble de bassins urbains (Marseille), de haute montagne en Italie du nord-est, de moyenne montagne dans les Cévennes, ainsi que pour les principaux grands affluents du Rhône et le Rhône lui-même.

Krigeage et variogramme

Le krigeage est une technique géostatistique d'estimation s'appuyant sur des mesures ponctuelles ou par télédétection d'une variable géophysique. Par rapport aux techniques d'estimation déterministes, le premier avantage du krigeage est de prendre en compte la structure spatiale de la variable d'intérêt. Pour ce faire, nous utilisons ici le variogramme qui permet de modéliser l'évolution de la corrélation des mesures en fonction de leur interdistance. Théoriquement égal à 0 pour une interdistance nulle, le variogramme présente parfois une valeur non nulle (appelée pépite) quand la distance tend vers 0. Cette pépite traduit l'existence d'une variabilité de fine échelle non perçue par le système d'observation et/ou la présence d'erreurs de mesure. Le deuxième avantage du krigeage est de fournir une appréciation de la qualité de l'estimation grâce à la variance d'estimation que l'on cherche précisément à minimiser dans la résolution du système de krigeage, en imposant également des conditions de non-biais. Par rapport au krigeage dit ordinaire des pluviomètres, le krigeage avec dérive externe utilise une variable secondaire spatialement distribuée, ici le champ de pluie radar.

La caractérisation des erreurs d'estimation de ces divers produits a fait l'objet d'une attention particulière.

Pour les produits Rad, nous considérons une pluie de référence issue des mesures pluviographiques par krigeage ordinaire, avec sélection de domaines de validation pour lesquels la variance d'estimation du krigeage est faible (et donc l'estimation est supposée de bonne qualité). Il s'agit des domaines contenant et/ou situés à proximité de pluviographes. Nous analysons ensuite les résidus (erreurs) entre valeurs radar et valeurs de référence pour une gamme de pas de temps d'intégration (de 1 à 24 h) et de tailles de domaines d'estimation (de 1 à 500 km²). Nous recommandons l'utilisation de modèles de type GAMLSS (*Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape*) proposés par Rigby et Stanisopoulos (2005) et Stanisopoulos et al. (2008) pour ce type d'analyse. Le lecteur intéressé trouvera dans Delrieu et al. (2013b) une première application de cette approche à l'étude de plusieurs événements pluvieux intenses observés en région cévenole. On y montre : que la cohérence entre estimations radar et pluie de référence augmente sensiblement avec les pas de temps d'intégration spatiaux et

temporels ; que la structure des erreurs radar peut être complexe avec une dépendance de l'erreur à l'intensité de pluie et des biais conditionnels variables à différentes échelles spatiotemporelles et/ou dans divers secteurs géographiques ; et que la fiabilité du réseau pluviographique pour établir les pluies de référence diminue très rapidement quand on intègre spatialement (et cela dès la surface de 5 km²).

Concernant les produits issus du krigeage ordinaire des données pluviographiques (Clim, Ani) et de la fusion radar-pluviographes (KED), nous avons développé une méthode de calcul des écarts types d'estimation s'articulant en trois étapes (Delrieu et al., 2013a) :

- calculs des écarts types d'estimation normés par l'utilisation de variogrammes également normés (paliers forcés à 1). Ces écarts types normés dépendent à la fois de la configuration relative du réseau de mesure et du domaine d'estimation, ainsi que de la structure spatiale de la variable à cartographier (via la portée et l'éventuelle pépite du variogramme), ainsi que des valeurs de la dérive pour ce qui est du KED ;

- première dénormalisation à l'aide d'une estimation locale de l'écart type des pluies au voisinage du domaine d'estimation. On estime pour cela une valeur moyenne de la pluie locale et on utilise une relation empirique reliant l'écart type à la moyenne des champs de pluie. Cette procédure permet de prendre en compte la non-stationnarité du champ de pluie et la dépendance de l'erreur à l'intensité de pluie ;

- deuxième dénormalisation s'appuyant sur une technique de validation croisée. Il s'agit en fait d'une calibration des écarts types d'estimation fondée sur un principe simple : pour chaque pluviographe, on procède à une estimation (Clim, Ani, KED) en mettant de côté la valeur observée au point considéré. En appliquant les deux premières étapes, on dispose d'une valeur estimée et de son écart type d'estimation ainsi que d'une valeur observée en chaque point et à chaque pas de temps d'estimation. On calcule, à l'aide de l'ensemble des points et pas de temps disponibles pour un épisode donné, un facteur multiplicatif correctif qui permet d'assurer que la moyenne des écarts types d'estimation est égale à l'écart type des résidus entre valeurs estimées et observées.

Une étape préliminaire à la mise en œuvre de ces estimations est la critique des données pluviométriques journalières et horaires. Il s'agit d'une opération difficile. Pour le pas de temps journalier, nous

avons développé une méthode de critique fondée sur la détection de valeurs aberrantes par rapport à leur voisinage par technique géostatistique (Kirstetter et al., 2010), couplée à des outils de visualisation des variogrammes et des cartes de pluie. Pour le pas de temps horaire, il s'est avéré pertinent de considérer de simples critères de corrélation entre séries temporelles pluviographiques et radar. Le constat de valeurs de corrélation faibles renvoie à l'examen des séries temporelles de base et à la détection d'éventuels problèmes de décalage horaire et/ou de pannes de transmission pour les données des pluviographes.

Illustrations pour l'année 2008

Un prototype de ré-analyses a été réalisé pour l'année 2008, avant un lancement plus systématique des calculs, afin d'effectuer une analyse préliminaire des résultats pouvant éventuellement remettre en cause certains aspects de la méthodologie. Il importe de noter que le radar de Nîmes n'a fonctionné qu'à partir du 15 juin cette année-là en raison de son remplacement. Sur l'ensemble de l'année, nous avons identifié 258 journées pluvieuses ; la figure 3 présente quelques exemples de cartes établies à partir des données pluviométriques journalières par krigeage ordinaire anisotrope. À ce pas de temps, la plupart des champs pluvieux présentent en effet une anisotropie marquée, liée à l'orographie comme dans le cas des 3 janvier 2008, 21 octobre 2008 et 1^{er} novembre 2008 ou bien à l'advection du champ pluvieux comme dans le cas des orages du 12 août 2008. Notons que les journées des 21 octobre 2008 et 1^{er} novembre 2008 sont les plus pluvieuses de l'année, avec des cumuls ayant excédé 400 mm localement.

La figure 4 présente la liste des 12 épisodes pluvieux significatifs finalement sélectionnés (soit 34 journées sur les 258 journées pluvieuses) pour l'élaboration des produits pluie au pas de temps infrajournalier. Ces 12 épisodes ont apporté plus de 95 % du cumul annuel et l'on a estimé que, pour les besoins d'une modélisation hydrologique continue (c'est-à-dire requérant des informations pluviométriques temporellement continues par opposition à une modélisation hydrologique événementielle), il pouvait être suffisant de disposer du cumul journalier pour les journées faiblement pluvieuses. Ce choix permet une réduction drastique des données radar à traiter ; si

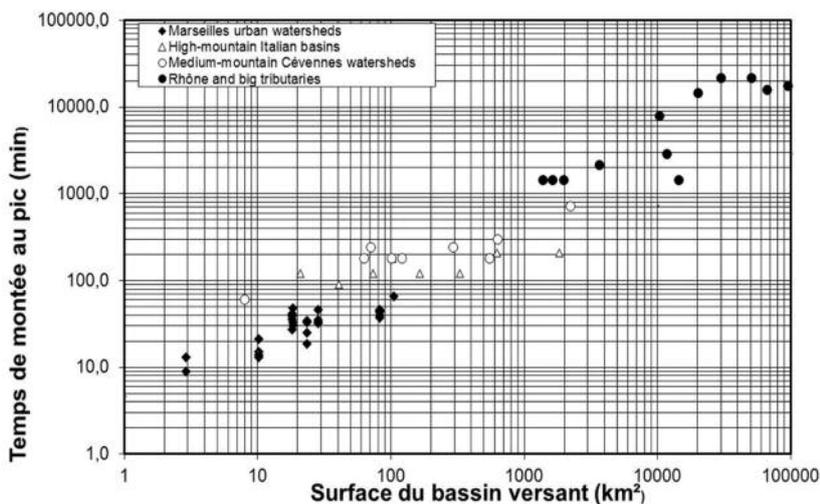


Figure 3. Exemples de cartes de pluie (en mm) au pas de temps journalier issues du réseau pluviométrique complet (410 stations) de 06:00 TU le jour même à 06:00 TU le lendemain. L'échelle de visualisation est adaptée en fonction du cumul maximum de chaque épisode.

une résolution temporelle plus fine est requise pour ces journées faiblement pluvieuses pour certaines applications, le réseau pluviographique pourra sans doute fournir une répartition spatiotemporelle des pluies de qualité suffisante. Sur cette même figure 4 sont représentés les résultats d'une étude comparative, par validation croisée, des différentes méthodes d'estimation présentées dans la section « Principe et méthodes ». Il s'agit d'estimations ponctuelles, au droit des pluviographes, réalisées en excluant la valeur observée au pluviomètre, pour l'ensemble des pas de temps horaires de chaque épisode. Concernant l'estimation par radar (Rad), la valeur estimée est simplement la valeur observée sur le pixel radar contenant le pluviomètre. Le critère calculé est le coefficient de Nash entre valeurs estimées et observées, assimilable à un coefficient de détermination (pourcentage de variance expliquée) par rapport à une droite de régression particulière : la première bissectrice.

Un premier élément frappant est que les performances du radar sont notablement inférieures à celles du réseau pluviographique pour les épisodes d'hiver et de printemps ; le radar est par contre sensiblement supérieur, au sens du critère considéré, au réseau pluviographique pour la plupart des épisodes d'été et d'automne, qui sont ceux qui génèrent habituellement les crues les plus marquées. L'altitude de l'isotherme 0 °C apparaît comme le facteur explicatif principal de ces résultats : en hiver, compte tenu de la relative faible extension des nuages précipitants, de la présence de la bande brillante liée à la couche de fusion et du relief, l'observation radar est fortement pénalisée et la correction de ces artefacts reste très difficile. La situation est plus favorable pour les pluies convectives, avec une extension verticale plus importante des nuages précipitants et la présence de couches de fusion moins marquées. Une valeur de l'isotherme 0 °C supérieure à 2000 m semble pouvoir être retenue (figure 4) pour qu'il y ait

plus-value du radar par rapport au réseau pluviographique dans ce contexte particulier. L'épisode 5 (24-27 mai 2008, isotherme 0 °C variant entre 2900 et 4000 m) fait exception ; cela semble dû au fait qu'il a principalement intéressé une zone fortement affectée par des problèmes d'échos de sol dont la correction demeure également très problématique. On gardera toutefois en mémoire que l'absence du radar de Nîmes dans la première moitié de l'année 2008 a certainement pénalisé les performances du radar (épisodes 1 à 5). Concernant le réseau pluviographique, on notera que :

- les performances du krigeage anisotrope et du krigeage « climatologique » sont similaires au pas de temps horaire, avec même deux anomalies (contre-performance du krigeage anisotrope) pour les cas des épisodes 2 et 6, peut-être dues à la présence d'artefacts dans l'imagerie radar ayant servi à l'inférence des variogrammes ;
- les performances du réseau pluviographique sont sensiblement moins bonnes l'été que l'hiver, ce qui s'explique par l'intermittence et la variabilité spatiale des pluies plus fortes dans le premier cas.

Les radars et le réseau pluviographique apparaissent donc comme complémentaires et c'est bien ce que l'on observe avec la performance de leur fusion par krigeage avec dérive externe, qui est systématiquement meilleure que le meilleur des deux systèmes d'observation pris séparément. On note un gain très appréciable par rapport au radar pour les épisodes d'été et d'automne, probablement dû à une réduction des biais locaux à l'aide des mesures pluviographiques. Il peut sembler paradoxal que la prise en compte d'une information radar de qualité médiocre (épisodes 1 et 11 en particulier) ne dégrade pas les performances du KED par rapport aux krigeages ordinaires des pluviographes pour les épisodes hivernaux : cela montre l'« intelligence » de cette méthode de fusion qui, via l'inférence du variogramme des résidus à la dérive, donne un poids plus ou moins grand à celle-ci. Nous recommandons la

N°	Date de la période	Altitude min isotherme 0 °C	Altitude max isotherme 0 °C
1	2 janvier 2008, 6h - 6 janvier 2008, 6h	1300 m	2900 m
2	10 janvier 2008, 6h - 12 janvier 2008, 6h	1200 m	2150 m
3	3 février 2008, 6h - 4 février 2008, 6h	1200 m	2600 m
4	17 avril 2008, 6h - 21 avril 2008, 6h	1700 m	2300 m
5	24 mai 2008, 6h - 27 mai 2008, 6h	2900 m	4000 m
6	11 août 2008, 6h - 13 août 2008, 6h	4000 m	4700 m
7	3 septembre 2008, 6h - 7 septembre 2008, 6h	3100 m	4300 m
8	7 octobre 2008, 6h - 9 octobre 2008, 6h	2700 m	3500 m
9	19 octobre 2008, 6h - 23 octobre 2008, 6h	2800 m	3400 m
10	31 octobre 2008, 6h - 3 novembre 2008, 6h	2000 m	3000 m
11	13 décembre 2008, 6h - 15 décembre 2008, 6h	1000 m	2150 m
12	29 décembre 2008, 6h - 1 ^{er} janvier 2009, 6h	900 m	2600 m

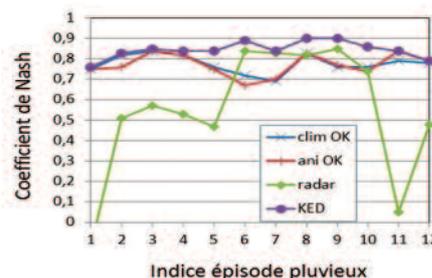


Figure 4. A gauche : liste des 12 épisodes sélectionnés en 2008, avec indication des altitudes minimales et maximales de l'isotherme 0 °C déterminé à l'aide des radiosondages de Nîmes. A droite : évolution pour les différents épisodes du coefficient de Nash entre valeurs estimées et observées (validation croisée) au pas de temps horaire, pour les quatre méthodes d'estimation présentées dans le texte.

mise en œuvre systématique de cet exercice de validation croisée qui permet d'apprécier la qualité respective des estimations issues des deux systèmes d'observation pris séparément et de leur fusion. Nous proposons d'en tenir compte dans le choix des épisodes pluvieux et/ou l'élaboration de produits pluie finaux, en écartant par exemple les données radar pour les épisodes pour lesquels celui-ci n'atteint pas un certain niveau de performance.

L'exemple de la figure 5 illustre le fonctionnement des trois méthodes d'estimation. On note sur les images du haut que la finesse de la bande pluvieuse perçue par le radar est bien préservée par le krigeage avec dérive externe ; dans ce cas, celui-ci corrige essentiellement l'estimation radar en prenant en compte une valeur pluviométrique de 72 mm observée au sol au centre de la bande. Cette valeur se trouve par contre lissée dans l'estimation par KO (qui culmine à 54 mm) du fait de la structure légèrement pépitique identifiée à l'aide des mesures pluviographiques. L'effet de « diffusion » lié à l'intégration spatiale entre les mailles de 5 et 100 km² est très marqué sur cet exemple.

La figure 6 illustre la quantification des erreurs d'estimation avec les cartes d'écart types d'estimation du KO et du KED correspondant aux images de pluie de la figure 5. Ces écart types ont été estimés selon la procédure brièvement décrite dans la section « Principe et méthodes ». On constate que les écart types d'estimation du KED sont inférieurs à ceux du KO, un résultat conforme aux indications de la figure 4 qui montrait la supériorité du KED par rapport au KO pour cet épisode. Le lecteur intéressé pourra trouver dans Delrieu et al. (2013a) les détails de la quantification de ces erreurs d'estimation et notamment l'importance de la procédure d'étalonnage des écart types d'estimation par validation croisée.

Finalement, la figure 7 présente une synthèse comparative des erreurs calculées par KO et par KED en fonction des échelles spatiales et temporelles considérées. La variable représentée est la moyenne des écart types d'erreur, rapportés aux valeurs de pluie estimées. La moyenne est prise sur l'ensemble des mailles hydrologiques et des pas de temps des épisodes 6 à 10, épisodes pour lesquels le radar apporte une plus-value par rapport au réseau pluviographique selon la figure 4. Cette figure montre clairement que c'est bien aux échelles les plus fines (et les plus pertinentes pour l'étude des crues cévenoles) que l'apport du radar est le plus grand.

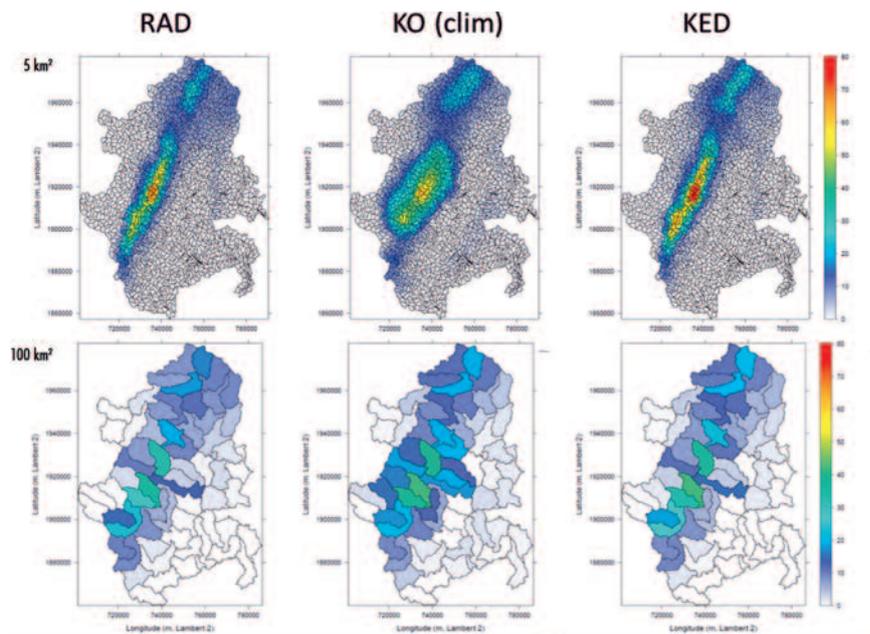


Figure 5. Exemple d'un champ pluvieux horaire observé lors de l'épisode des 19-22 octobre 2008 (entre 21:00 et 22:00 TU le 21), avec, à gauche, l'estimation radar, au centre, l'estimation issue du réseau pluviographique par krigeage ordinaire et, à droite, celle issue de la fusion radar-pluviomètre par krigeage avec dérive externe. Les graphes du haut correspondent au « maillage hydrologique » de 5 km² et ceux du bas à celui de 100 km². Le domaine d'estimation couvre les bassins versants de l'Ardèche, de la Cèze, des Gardons et du Vidourle.

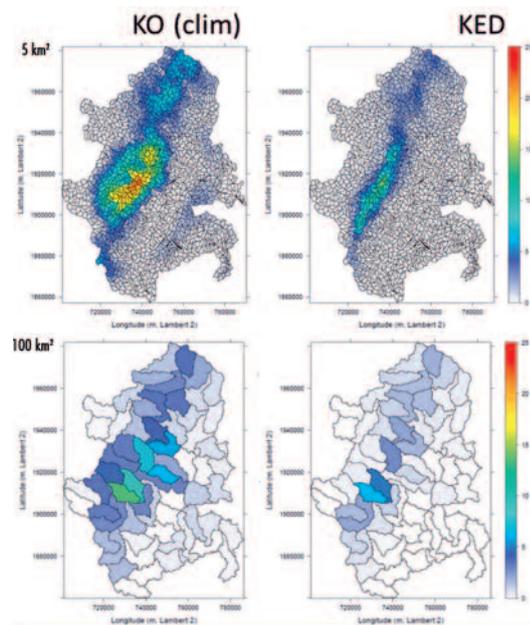


Figure 6. Cartes des écart types d'estimation du krigeage ordinaire (à gauche) et du krigeage avec dérive externe (à droite) pour les maillages hydrologiques de 5 (haut) et 100 km² (bas) pour l'exemple du 21 octobre 2008 (21:00–22:00 TU).

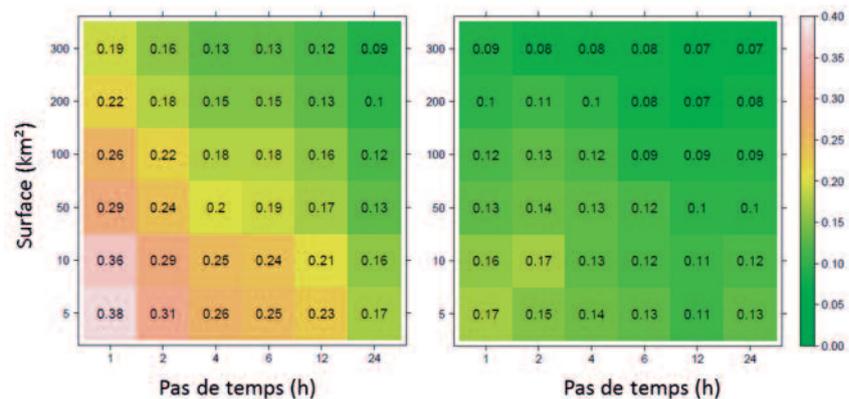


Figure 7. Valeurs moyennes des écart types d'erreur normés par l'estimation de pluie pour les estimations issues du krigeage ordinaire (à gauche) et du krigeage avec dérive externe (à droite) en fonction des pas de temps et d'espace considérés, pour les épisodes 6 à 10.

Conclusions et perspectives

Ce travail préliminaire a permis de développer une méthodologie d'estimation des précipitations s'appuyant sur l'ensemble des données opérationnelles de la région Cévennes-Vivarais, dans l'optique d'un traitement systématique de séries temporelles continues. Le radar et le réseau pluviographique ont été « mis en compétition » par l'application de trois méthodes d'estimation reposant sur chaque système d'observation séparément et sur leur fusion. On a pu montrer que l'apport quantitatif du radar n'était effectif que pour les épisodes pluvieux pour lesquels l'isotherme 0 °C est à une altitude supérieure à 2000 m, ce qui pose la question de l'utilisation même de l'imagerie radar dans ces ré-analyses pour les épisodes hivernaux. Pour les épisodes d'été et d'automne, qui sont ceux conduisant aux phénomènes de crues marquées dans la région, le radar apporte une indéniable plus-value et la fusion radar-pluviographe par krigeage avec dérive externe permet de combiner efficacement les qualités des deux systèmes d'observation (résolution spatio-temporelle du radar et mesure directe des pluviographes). Le gain apporté par le radar est d'autant plus marqué que les échelles spatiales et temporelles sont fines. La quantification des erreurs d'estimation est un aspect fondamental de ce travail, qui a fait l'objet d'avancées méthodologiques significatives.

À court terme, la ré-analyse va être étendue aux années 2007-2012 pour lesquelles on dispose des mosaïques Panthere correspondant aux nouveaux algorithmes de traitement radar opérationnels mis en place en 2007. Il est également envisagé d'effectuer un travail d'évaluation des ré-analyses Comephore pour certains épisodes remarquables de la période 1997-2006 dans les Cévennes, épisodes que nous avons pu étudier en détail dans le cadre de diverses études. Ces efforts concertés avec Météo-France devraient conduire à la définition d'un cahier des charges pour les ré-analyses pluviométriques que Météo-France prévoit de réaliser sur la période 2007 à actuel, à l'échelle de l'ensemble du territoire français. L'utilisation des ré-analyses par la communauté de recherche en hydrologie est bien évidemment encouragée et le prototype réalisé pour 2008 est d'ores et déjà disponible sur la base de données de l'OHM-CV. Dans le cadre du projet FloodScale, nous prévoyons de développer différentes techniques de génération ensembliste de séries spatio-temporelles

de pluie s'appuyant sur les ré-analyses et leurs modèles d'erreur afin de caractériser l'impact de ces erreurs d'estimation des pluies sur la réponse des modèles hydrologiques distribués. Notons également que, dans le cadre des périodes d'observations intensives d'HyMeX, le système opérationnel d'observation des pluies cévenoles a été renforcé par un ensemble de pluviomètres et de disdromètres destinés à être pérennisés, répartis selon diverses configurations (réseau dense en Ardèche ; transects échantillonnant le gradient d'altitude) ; des radars bande X sont également mis en œuvre pendant les automnes 2012 et 2013 pour renforcer l'observation des pluies sur le piémont cévenol. L'ensemble de ces observations devrait nous permettre d'explorer les « échelles manquantes » du système opérationnel d'observation et de progresser dans notre connaissance des pluies cévenoles.

Remerciements

Nous remercions notre collègue Charles Obled, professeur émérite à Grenoble-INP, pour ses conseils avisés en géostatistique et son intérêt pour ce travail. L'OHM-CV bénéficie du soutien récurrent de l'Institut national des sciences de l'univers, section Surface et interfaces continentales, ainsi que de l'Observatoire des sciences de l'univers de Grenoble. Une partie des développements méthodologiques a été effectuée dans le cadre des projets ANR Pre DiFlood et FloodScale. Les données nécessaires à ces ré-analyses sont fournies par Météo-France, le Service de prévision des crues du grand delta et Électricité de France ; nous remercions ces organismes et nos interlocuteurs chargés de la fourniture des données au sein de ceux-ci.

Bibliographie

- Berne A., G. Delrieu, J.D. Creutin et C. Obled, 2004 : Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. *J. Hydrol.*, 299, 166-179.
- Delrieu G., B. Boudevillain, J. Nicol, B. Chapon, P.-E. Kirstetter, H. Andrieu et D. Faure, 2009 : Bollène 2002 experiment: radar quantitative precipitation estimation in the Cévennes-Vivarais region, France. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 48, 1422-1447.
- Delrieu G., A. Wijbrans, B. Boudevillain, L. Bonnifait, D. Faure, P.-E. Kirstetter et A. Confoland, 2013a : Radar-rain gauge quantitative precipitation estimates: a method for calibrating Kriging estimation variances. *Adv. Water Res.*, in preparation.
- Delrieu G., L. Bonnifait, P.-E. Kirstetter et B. Boudevillain, 2013b : Dependence of radar quantitative precipitation estimation error on the rain intensity in the Cévennes region, France. *Hydrol. Sci. J.*, sous presse.
- Drobinski P., V. Ducrocq, S. Bastin, S. Bélamari, K. Béranger, O. Bock, B. Boudevillain, M.-N. Bouin, I. Braud, J.-C. Calvet, A. Chanzy, L. Coppola, D. Courault, G. Delrieu, C. Estoumel, C. Flamant, H. Giordani, L. Labatut, C. Lutoff, E. Martin, J.-F. Mahfouf, L. Mastrorillo, F. Orain, K. Ramage, E. Richard, J.-L. Roujean, O. Roussot, I. Ruin, S. Somot, I. Taupier-Letage, P. Testor et W. Ludwig, 2013 : HyMeX, le cycle de l'eau méditerranéen à la loupe. *La Météorologie*, 80, 23-36.
- Ducrocq V., S. Belamari, B. Boudevillain, O. Bousquet, P. Cocquerez, A. Doerenbecher, P. Drobinski, C. Flamant, L. Labatut, D. Lambert, M. Nuret, E. Richard, O. Roussot, P. Testor, P. Arbogast, P.-A. Ayrat, J. Van Baelen, C. Basdevant, J.-L. Boichard, D. Bourras, C. Bouvier, M.-N. Bouin, O. Bock, I. Braud, C. Champollion, L. Coppola, S. Coquillat, E. Defer, J. Delanoë, G. Delrieu, P. Durand, C. Estoumel, N. Fourié, O. Garrouste, H. Giordani, J. Le Coz, Y. Michel, O. Nuissier, G. Roberts, F. Said, A. Schwarzenboeck, K. Sellegri, I. Taupier-Letage et J.-P. Vandervaere, 2013 : HyMeX, les campagnes de mesures : focus sur les événements extrêmes en Méditerranée. *La Météorologie*, 80, 37-47.
- Erdin R., C. Frei et H.-R. Künsch, 2012 : Data transformation and uncertainty in geostatistical combination of radar and rain gauges. *J. Hydrometeorol.*, 13, 1332-1346.
- Goudenhoofd E. et L. Delobbe, 2009 : Evaluation of radar gauge merging methods for quantitative precipitation estimates. *Hydrol. Earth Sys. Sci.*, 13, 195-203.
- Kirstetter P.-E., G. Delrieu, B. Boudevillain et C. Obled, 2010 : Toward an error model for radar quantitative precipitation estimation in the Cévennes-Vivarais region, France. *J. Hydrol.*, 394, 28-41.
- Lebel T., G. Bastin, C. Obled et J.D. Creutin, 1987 : On the accuracy of areal rainfall estimation: a case study. *Water Resour. Res.*, 23, 2123-2134.
- Rigby R.A. et D.M. Stasinopoulos, 2005 : Generalised additive models for location, scale and shape. *Appl. Stat.*, 54, 507-554.
- Stasinopoulos D., B. Rigby et C. Akantziliotou, 2008 : Instructions on how to use the GAMLSS package in R. 2nd ed, available at: <http://www.gamlss.org/wp-content/uploads/2013/01/gamlss-manual.pdf>.
- Tabary P., 2007 : The new French operational radar rainfall product: Part I. Methodology. *Wea. Forecast.*, 22, 393-408.
- Tabary P., J. Desplats, K. Dokhac, F. Eideliman, C. Guéguen et J.-C. Heinrich, 2007 : The new French operational radar rainfall product. Part 2. Validation. *Wea. Forecast.*, 22, 409-427.
- Tabary P., P. Dupuy, G. L'Hénaff, C. Guéguen, L. Moulin, O. Laurantin, C. Merlier et J.-M. Soubeyrou, 2012 : A 10-year (1997-2006) reanalysis of quantitative precipitation estimation over France: methodology and first results. *IAHS Pub.*, 351, 255-260.
- Velasco-Forero C.A., D. Sempere-Torres, E.F. Cassiraga et J.J. Gomez-Hernandez, 2009 : A non-parametric automatic blending methodology to estimate rainfall fields from rain gauge and radar data. *Adv. Water Res.*, 32, 986-1002.