

1. Mise en évidence de relations spatiales entre la circulation atmosphérique générale et les précipitations mesurées dans le bassin alpin du Rhône, à l'aide de la méthode des analogues.

par

Pascal HORTON¹, Michel JABOYEDOFF¹, Richard METZGER¹, Charles OBLED²
& Renaud MARTY²

Résumé.—HORTON P., JABOYEDOFF M., METZGER R., OBLED C. & MARTY R., 2013. Mise en évidence de relations spatiales entre la circulation atmosphérique générale et les précipitations mesurées dans le bassin alpin du Rhône, à l'aide de la méthode des analogues. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 11-21.

La méthode des analogues, une technique d'adaptation statistique pour la prévision de précipitations, a été implémentée pour le bassin versant du Rhône à l'amont du Léman. La méthode est basée sur la recherche de situations analogues dans le passé ayant des caractéristiques de la circulation atmosphérique générale proches du jour à prévoir. La prévision est alors établie sur la base des précipitations observées aux stations pluviométriques pour les jours analogues.

La calibration de la méthode consiste à identifier les meilleurs prédicteurs expliquant au mieux les précipitations observées. Une étape de la calibration est la création de cartes de pertinence des prédicteurs potentiels, permettant la mise en évidence des régions où ces prédicteurs synoptiques ont une capacité prévisionnelle. Nous avons alors pu observer que les zones les plus pertinentes correspondent aux emplacements où la circulation atmosphérique est dominante durant les événements à fortes précipitations. Les calculs des trajectoires inverses des masses d'air pour ces journées permettent de mettre en évidence que la circulation atmosphérique diverge de manière récurrente de la climatologie, en intensité et/ou en direction, lors des journées à fortes précipitations dans le bassin du Rhône.

Mots clés: Méthode des analogues, descente d'échelle, prévision, précipitations, adaptation statistique, circulation atmosphérique générale, Rhône.

Abstract.—HORTON P., JABOYEDOFF M., METZGER R., OBLED C. & MARTY R., 2013. Highlight of spatial relationships between the global atmospheric circulation and measured rainfall in the alpine Rhône catchment by means of the analogue method. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 11-21.

The analogue method, which is an adaptation technique for precipitation forecasting, has been implemented for the alpine Rhône catchment. It is based on the identification of analogue situations

¹Centre de Recherche en Environnement Terrestre (anciennement Institut de Géomatique et d'Analyse du Risque), Faculté des Géosciences et de l'Environnement, Université de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Suisse.

²LTHE, Institut polytechnique de Grenoble (Grenoble INP), France.
E-mail: Pascal.Horton@unil.ch

in the past with similar characteristics of the global atmospheric circulation to the target day. The forecast is then established on the basis of the observed precipitation at the rain gauge stations of the analogue days.

The method calibration aims at identifying the predictors that explain at best the observed rainfall. One of the calibration stages consists in creating relevance maps of the predictors that allow identifying the regions with forecasting capabilities. We could thus observe that the most pertinent regions correspond to locations where the atmospheric circulation is dominant during heavy rainfall events. Air masses back trajectories for those events allow identifying that the atmospheric circulation diverges from the climatology in a recurrent way during heavy precipitation days in the Rhône catchment, both in intensity and direction.

Keywords: Analogue method, downscaling, forecasting, precipitation, statistical adaptation, global atmospheric circulation, Rhône.

INTRODUCTION

Cette étude fait partie du projet MINERVE (Modélisation des Intempéries de Nature Extrême du Rhône Valaisan et de leurs Effets), dont le but est de créer un outil de gestion des risques de crue du Rhône en temps réel (GARCÍA HERNÁNDEZ *et al.* 2009). La prévision ouvre la possibilité à des actions de laminage dans les retenues. Afin de disposer d'une tranche de crue suffisante dans les barrages, il peut être nécessaire de libérer ce volume d'eau un ou deux jours avant l'événement. Ceci implique d'anticiper au mieux la quantité et la localisation des précipitations prévues.

Actuellement, MétéoSuisse fournit les prévisions COSMO (Consortium for Small-scale Modeling) (STEPPELER *et al.* 2003) et COSMO-LEPS (Limited Area Ensemble Prediction System) (MONTANI *et al.* 2003, MARSIGLI *et al.* 2005) au projet. Notre but est de fournir des prévisions parallèles basées sur une approche statistique, à savoir la méthode des analogues. Cette technique permet de fournir des informations d'une autre nature que les modèles numériques, et ne souffre pas du même biais que ceux-ci sur l'estimation des quantités de précipitation. De plus, la méthode offre une analyse alternative des événements extrêmes, qui ne sont pas forcément bien prévus par les modèles numériques de par la complexité des processus orographiques. Les décideurs seront alors à même de mieux évaluer les incertitudes météorologiques. Cette approche permet également de donner un aperçu de la circulation atmosphérique générale et de ses éléments déterminants, ainsi que la possibilité de se référer à des événements passés.

La méthode des analogues est une technique d'adaptation permettant la prévision de la précipitation journalière par identification de situations analogues en termes de circulation synoptique. La méthode choisie est similaire à celle développée par BONTRON (2004), BONTRON & OBLED (2005), BEN DAUD *et al.* (2009), et MARTY (2012). Cet article présente quelques observations effectuées lors de la calibration de la méthode pour le bassin alpin du Rhône.

Une étape de la calibration consiste à créer des cartes de pertinence des prédicteurs potentiels, permettant la mise en évidence des régions où ces prédicteurs synoptiques ont une capacité prévisionnelle pour deux stations pluviométriques d'intérêt. Ces deux stations, situées dans le bassin alpin du Rhône à une distance respective de 100km, sont sensibles à des circulations synoptiques différentes. La signification météorologique de ces cartes sera analysée en comparaison avec les trajectoires inverses des masses d'air pour les jours à forte précipitation.

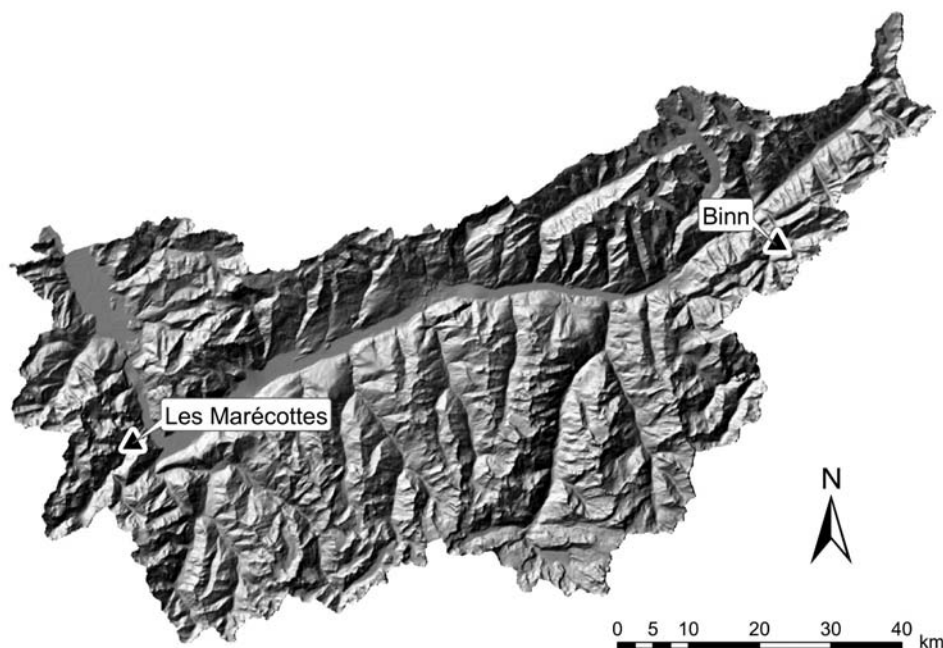


Figure 1.–Localisation de deux stations pluviométriques d'intérêt dans le bassin du Rhône alpin. (Source: Swisstopo)

Zone d'étude et données

La zone d'étude est le bassin versant du Rhône alpin en Suisse. Notre calibration sera illustrée pour deux stations pluviométriques sensibles à des circulations atmosphériques différentes (figure 1). Les Marécottes est sensible à un flux zonal intense, alors que Binn est très sensible à des remontées du sud.

Les données utilisées en tant que prédicteurs sont les réanalyses NCEP/NCAR (17 niveaux atmosphériques à une résolution de 2.5°; voir KALNAY *et al.* 1996). Les prédictands sont les séries de précipitations journalières mesurées aux stations du réseau de MétéoSuisse, sur la période 1962-2007.

Nous avons développé le modèle implémenté pour les prévisions en temps réel. Il s'appelle ATMOSWING (Analogue Technique MOdel for Statistical Weather forecastING) et a été écrit en C++ avec une architecture orientée objets. Il permet de calculer automatiquement la prévision et d'en visualiser les résultats dans un SIG (Système d'Information Géographique) intégré.

MÉTHODE

La méthode des analogues est une méthode d'adaptation statistique basée sur l'idée de LORENZ (1969). Elle cherche à prévoir un prédictand, telle que la précipitation journalière,

sur la base de la circulation atmosphérique générale. Son hypothèse principale est que des situations similaires en termes de circulation atmosphérique sont susceptibles d'entraîner des conditions météorologiques locales similaires (BONTRON & OBLED 2005). Ceci a été observé par différentes études pour la région alpine (MASSACAND *et al.* 1998, GRAZZINI 2007, MARTIUS *et al.* 2006, 2008, FEHLMANN *et al.* 2000).

La méthode des analogues

La prévision par analogie est décrite de manière résumée ci-dessous, et certains aspects et paramètres ne sont pas détaillés. Pour une description plus complète, le lecteur peut se référer à BEN DAOU (2009), BONTRON & OBLED (2005), MARTY (2012), OBLED *et al.* (2002). L'approche de la prévision en temps réel est constituée des étapes suivantes:

1. Des variables d'intérêt résultant d'un modèle de circulation générale (GCM, Global Circulation Model) en cas de prévision ou des réanalyses NCEP/NCAR (KALNAY *et al.* 1996) lors de la calibration, sont acquises pour l'échéance de prévision désirée. Le modèle global est ainsi responsable de l'extrapolation temporelle.

2. Le premier niveau d'analogie est effectué sur la circulation générale. BONTRON (2004) a démontré que l'altitude des champs de géopotentiels 500hPa et 1000hPa sont les deux meilleurs prédicteurs de l'archive des réanalyses pour le premier niveau. Les données de ces champs sont donc comparées à toute l'archive, dans un intervalle de jours autour de la date concernée (habituellement ± 60 jours) afin de se prémunir des effets saisonniers, et sur une certaine fenêtre spatiale. Le critère est la similitude des gradients, donc de forme des champs, quantifié par le score S1 (Equation 1) (TEWELES & WOBUS 1954, DROSDOWSKY & ZHANG 2003).

$$S1 = 100 \frac{\sum_i |\Delta \hat{z}_i - \Delta z_i|}{\sum_i \max(|\Delta \hat{z}_i|, |\Delta z_i|)} \quad (\text{Equation 1})$$

où $\Delta \hat{z}_i$ est la différence de pression entre la $i^{\text{ème}}$ paire de points adjacents des données du modèle de prévision global sur la fenêtre spatiale choisie, et Δz_i est la différence correspondante sur les données des réanalyses. Plus S1 est faible, plus les champs de pression sont similaires.

3. Les N jours avec les valeurs de S1 les plus faibles sont retenus comme les meilleurs analogues au jour cible. Le nombre d'analogues, N , est un paramètre à calibrer.

4. Il est possible d'ajouter de multiples étapes de sous-échantillonnage, basées sur d'autres variables, afin de réduire le nombre d'analogues à N' . Une application courante consiste par exemple, dans un second niveau de sélection, à intégrer l'information de l'humidité.

5. Finalement, les volumes de précipitations observés lors des N' jours fournissent la distribution de probabilité conditionnelle empirique spécifique au jour cible.

Calibration

Pour chaque niveau d'analogie, le nombre d'analogues doit être calibré. A l'intérieur de ces étapes, les paramètres à calibrer pour chaque prédicteur sont:

- Les niveaux atmosphériques à utiliser
- Les fenêtres spatiales (leur position et leur taille)
- Les heures des prédicteurs (0, 6, 12 ou 18h)

Pour calibrer la méthode, il est nécessaire d'entraîner le modèle sur une longue période (1962-2007). Puisque les sorties de prévisions des GCM ne sont pas archivées sur de très longues périodes, la calibration de la méthode est effectuée dans un cadre de prévision parfaite, à l'aide du jeu de données des réanalyses. La pertinence du modèle est évaluée à l'aide du score CRPS (Continuous Ranked Probability Score) (BROWN 1974, MATHESON & WINKLER 1976). Soit x la précipitation avec x^0 la valeur observée, et $F(x)$ la fonction de répartition (cdf) des valeurs prévues. Le CRPS d'une série prévue de taille n s'écrit:

$$CRPS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\int_{-\infty}^{+\infty} [F_i(x) - H_i(x - x_i^0)]^2 dx \right) \quad (\text{Equation 2})$$

Où $H(x - x_i^0)$ est la fonction de Heaviside qui est nulle lorsque $x - x_i^0 < 0$ et qui vaut 1 autrement.

Le CRPS est calculé sur la période de calibration. Les meilleurs prédicteurs sont sélectionnés sur la base de ce score final, puis évalués sur une période de validation.

Etablissement de cartes de pertinence

La carte de pertinence est une représentation spatiale des capacités prévisionnelles de chaque cellule de la grille de données du prédicteur. Pour l'établir, une fenêtre spatiale de taille unitaire est déplacée sur tout le domaine et chaque emplacement est évalué (BONTRON & OBLED 2005). De ce processus résulte une carte des scores CRPS permettant de visualiser la localisation de la circulation atmosphérique ayant une importance pour la détermination des précipitations à la station d'intérêt.

Les zones les plus pertinentes ne sont pas forcément les mêmes pour différentes stations, mais correspondent aux caractéristiques météorologiques de leur région. La localisation optimale des prédicteurs devrait être cohérente avec les phénomènes météorologiques influençant le temps sensible de la région.

RÉSULTATS

Des cartes de pertinence ont été créées pour les stations de *Binn* et des *Marécottes* sur les niveaux atmosphériques 500hPa et 1000hPa (figure 2), toujours pour l'heure optimale. L'heure est exprimée relativement au centre (18h) de la période de mesure des précipitations (6h à 6h le lendemain), résultant en une différence de temps Δt . Si $\Delta t = 0h$ pour les deux stations au niveau 500hPa, la différence varie de -6h pour Binn à +6h pour les Marécottes au niveau 1000hPa.

Le score CRPS peut être comparé entre les différents niveaux atmosphériques pour une même station, mais pas entre les stations car il n'est pas normé. Comme nous pouvons le voir sur les deux cartes de pertinence pour Binn (figure 2a et b), le niveau 500hPa

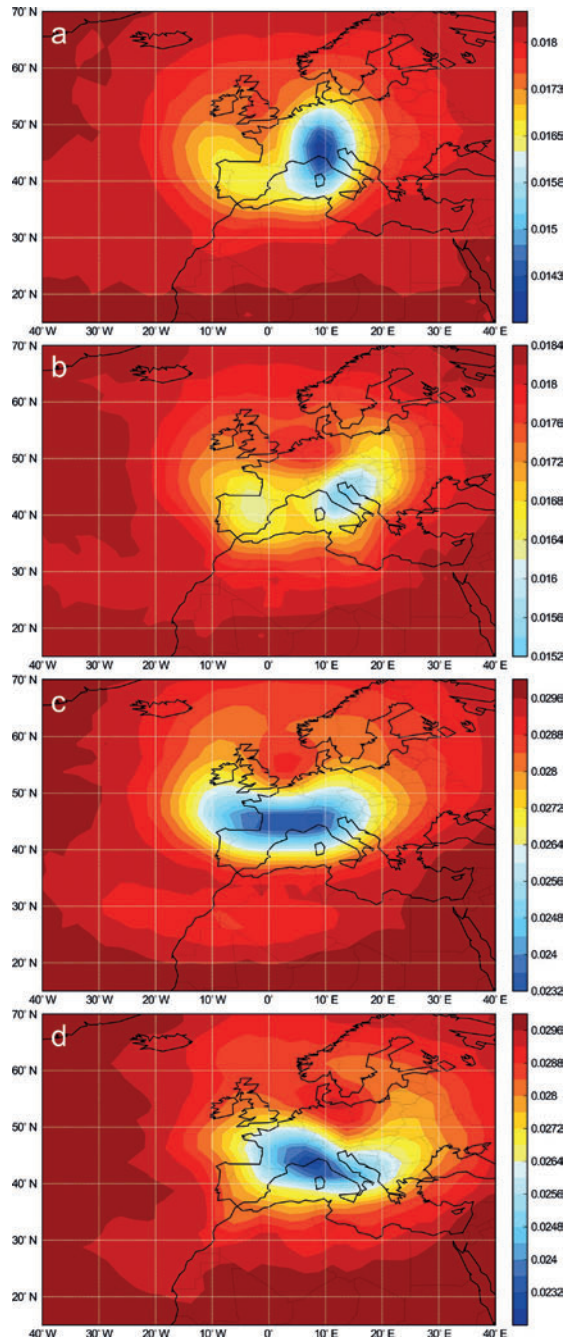


Figure 2.—Cartes de pertinence (a) au niveau 500 hPa à $\Delta t = 0$ h et (b) 1000 hPa à $\Delta t = -6$ h pour la station de Binn, et (c) au niveau 500 hPa à $\Delta t = 0$ h et (d) 1000 hPa à $\Delta t = -6$ h pour la station des Marécottes. Les valeurs sont les scores CRPS. (D'après HORTON *et al*, 2011)

explique mieux les précipitations dans cette région que le niveau 1000hPa. La différence est importante et peut être exprimée par l'hétérogénéité sur le niveau 1000hPa. En effet, ce niveau atmosphérique présente un premier emplacement optimal dans la mer Adriatique et sur l'Italie et un second sur l'Espagne. Cette hétérogénéité est certainement liée à des processus météorologiques distincts. Une autre raison potentielle de la prépondérance du 500hPa est l'importance d'un fort courant d'altitude aidant les précipitations intenses à passer la barrière orographique (MASSACAND *et al.* 1998).

A l'opposé, les cartes de pertinence pour la station des Marécottes (figure 2c et d) présentent un meilleur score pour le niveau 1000hPa que pour le 500hPa.

Pour les deux stations, les zones les plus pertinentes incluent le bassin versant au niveau 500hPa, ce qui n'est pas le cas au niveau 1000hPa, où elles sont situées davantage au sud.

ANALYSES MÉTÉOROLOGIQUES

Les trajectoires isobariques (DANIELSEN 1961) inverses des masses d'air ont été calculées sur la base du champ des vitesses des données NCEP/NCAR (KALNAY *et al.* 1996) pour chaque jour avec une quantité de précipitations au-delà d'un seuil choisi, à la station d'intérêt.

Les trajectoires inverses des masses d'air au niveau 500hPa des jours avec plus de 50mm de précipitations à la station de Binn (figure 3) montrent une tendance claire divergeant de la climatologie caractérisée par le flux zonal. La circulation atmosphérique a une forte composante du sud proche de la station. Il est reconnu que les remontées du sud peuvent engendrer de forts cumuls de précipitations pour cette région, particulièrement en automne (MASSACAND *et al.* 1998). Certaines analyses des conditions atmosphériques d'événements à fortes précipitations ont permis d'identifier des précurseurs de haute altitude dans les champs de géopotentiels et les tourbillons potentiels (MASSACAND *et al.* 1998). Cette anomalie est une intrusion profonde d'air stratosphérique de forme allongée méridionalement (MARTIUS *et al.* 2006), accompagnée d'une dorsale clairement identifiable au niveau 500hPa (FEHLMANN *et al.* 2000, PLAUT *et al.* 2001, GRAZZINI 2007). Une circulation du sud



Figure 3.—Trajectoires isobariques inverses au niveau 500 hPa des jours avec des précipitations supérieures à 50 mm à la station de Binn. (Source: GoogleEarth)

semble donc être nécessaire pour engendrer des événements de précipitation extrême dans la région Binn-Simplon, mais d'autres facteurs doivent également être considérés, puisque l'occurrence de ce flux est supérieure à celle des précipitations extrêmes (MARTIUS *et al.* 2006, GRAZZINI 2007). Notre analyse des trajectoires inverses des masses d'air montre que cette tendance est quasiment une règle pour chaque événement de précipitation significatif à Binn (HORTON *et al.* 2009). Nous avons en effet observé que pour 152 jours avec des précipitations supérieures à 50mm à la station de Binn, uniquement 3 ne présentent pas une trajectoire du sud, ce qui signifie qu'une telle circulation était présente pour 98% des événements.

Une autre illustration de ce propos est donnée par la rose des vents (figure 4). Nous pouvons voir que les jours à fortes précipitations à la station de Binn ont un flux de sud important au niveau 500hPa qui diverge de la climatologie moyenne des réanalyses NCEP/NCAR sur la période 1962-2007 (figure 5).

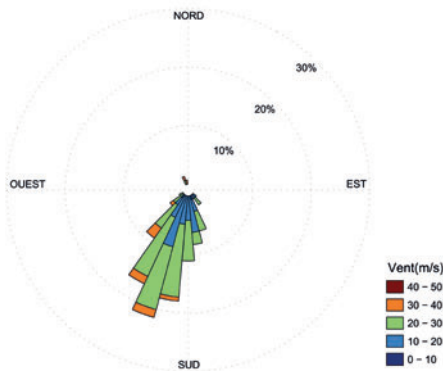


Figure 4.—Rose des vents au niveau 500 hPa pour les jours avec des précipitations supérieures à 50 mm à la station de Binn (1962-2007).

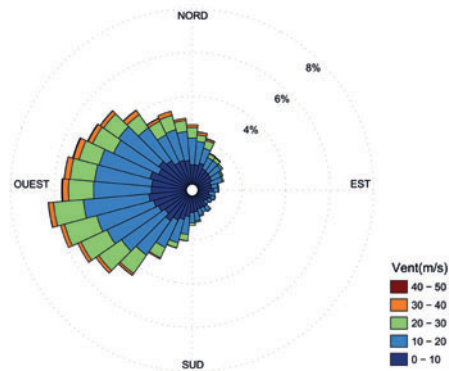


Figure 5.—Rose des vents au niveau 500 hPa de la climatologie des réanalyses NCEP/NCAR (sur la période 1962-2007).

En faisant la même analyse pour la station des Marécottes, nous pouvons voir tant sur les trajectoires inverses (figure 6) et sur la rose des vents (figure 7) que le flux d'ouest est dominant. Cette direction correspond au flux zonal de la climatologie moyenne. L'information de la direction ne peut donc pas être utilisée pour discriminer les situations critiques. Pourtant, les intensités de vent lors de ces journées sont bien plus importantes que celles de la climatologie, ce qui représente un potentiel de discrimination dans une méthode statistique.

Lorsque nous comparons les trajectoires inverses et les cartes de pertinence au niveau 500 hPa, les similitudes sont évidentes. Pour Binn, la carte de pertinence présente la même ondulation de la circulation que les trajectoires inverses. La même analyse peut être faite pour les Marécottes avec une dominance du flux zonal durant les jours à fortes précipitations. Le critère que nous utilisons pour identifier les analogues, soit le score S1, intègre en fait, à travers les gradients, autant les informations de direction que d'intensité du vent.

Ces analyses confirment que les zones les plus pertinentes pour la méthode des analogues correspondent aux emplacements d'influence de la circulation atmosphérique lors d'événements de fortes précipitations.

Des études précédentes ont également montré que les précipitations abondantes se produisent surtout pour des situations cycloniques du sud-ouest à sud-est dans le Haut Valais et d'ouest dans le reste du bassin (ATTINGER & FALLOT, 2003), ce qui confirme les résultats présentés ici pour les 2 stations de Binn et des Marécottes.



Figure 6.–Trajectoires isobariques inverses au niveau 500 hPa des jours avec des précipitations supérieures à 50 mm à la station des Marécottes. (Source: GoogleEarth)

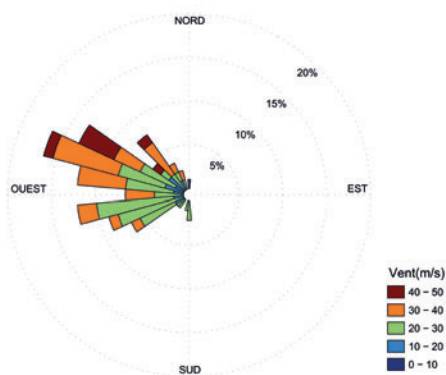


Figure 7.–Rose des vents au niveau 500 hPa pour les jours avec des précipitations supérieures à 50 mm à la station des Marécottes (1962-2007).

CONCLUSIONS

L'analyse des trajectoires inverses et des roses des vents révèle que le jeu de données des réanalyses contient de l'information utile pour une méthode de prévision statistique, malgré sa résolution (2.5°). Il apparaît également que la circulation atmosphérique diverge de la climatologie lors des événements de fortes précipitations et qu'une récurrence de ces conditions est visible pour ces jours-là. Ceci révèle de robustes précurseurs pouvant être utilisés dans une méthode d'adaptation statistique, telle que la méthode des analogues.

Les cartes de pertinence, établies durant la calibration de la méthode des analogues pour deux régions dans le bassin alpin du Rhône, montrent une bonne cohérence avec des caractéristiques connues de la circulation atmosphérique. Plus spécifiquement, les données les plus pertinentes pour la méthode sont situées aux emplacements où la circulation atmosphérique est dominante lors d'événements à forte précipitation.

REMERCIEMENTS

Le projet MINERVE est développé en partenariat par l'Office Fédéral de l'Environnement, les Services des Routes et Cours d'Eau, de l'Energie et des Forces Hydrauliques du Canton du Valais et par le Service des Eaux, Sols et Assainissement du Canton de Vaud. MétéoSuisse fournit les prévisions météorologiques et les sociétés hydroélectriques communiquent les informations relatives à leurs aménagements. Les bureaux d'ingénieurs HydroCosmos et Epicard contribuent aux aspects informatiques. Les développements scientifiques sont confiés à deux entités de l'EPFL, le Laboratoire d'Écohydrologie et le Laboratoire de Constructions Hydrauliques, ainsi qu'à l'Institut de Géomatique et d'Analyse du Risque de l'UNIL. La collaboration fructueuse avec le Laboratoire des Transferts en Hydrologie et Environnement du Grenoble-INP a été rendu possible grâce à la fondation Herbettes. Les réanalyses NCEP ont été fournies par le NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, depuis leur site internet <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>. Merci également à Jean-Michel Fallot et Loris Foresti pour leurs corrections qui ont permis d'améliorer cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- ATTINGER S. & FALLOT J.-M., 2003. Fréquence des intempéries et des précipitations abondantes en Valais (Alpes suisses occidentales) durant le 20^{ème} siècle. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie* 15: 253-259.
- BEN DAOUD A., SAUQUET E., LANG M., OBLED C. & BONTRON G., 2009. La prévision des précipitations par recherche d'analogues: état de l'art et perspectives. *La Houille Blanche* 6: 60-65.
- BONTRON G., 2004. Préhension quantitative des précipitations: Adaptation probabiliste par recherche d'analogues. Utilisation des Réanalyses NCEP/NCAR et application aux précipitations du Sud-Est de la France. Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- BONTRON G. & OBLED C., 2005. L'adaptation probabiliste des prévisions météorologiques pour la prévision hydrologique. *La Houille Blanche* 1: 23-28.
- BROWN T., 1974. Admissible Scoring Systems for Continuous Distributions. Manuscript P-5235, The Rand Corporation, Santa Monica, CA: 22 pp.
- DANIELSEN E. F., 1961. Trajectories: Isobaric, Isentropic and Actual. *J. Atmos. Sci.* 18: 479-486.
- DROSDOWSKY W. & ZHANG H., 2003. Forecast Verification. Chap. Verification of Spatial Fields, pp. 121-136, Wiley.
- FEHLMANN R., QUADRI C. & DAVIES H. C., 2000. An Alpine Rainstorm: Sensitivity to the Mesoscale Upper-Level Structure. *Weather Forecast.* 15: 4-28.
- GARCÍA HERNÁNDEZ J., HORTON P., TOBIN C. & BOILLAT J., 2009. MINERVE 2010: Préhension Hydrométéorologique et Gestion de Crues sur le Rhône Alpin, *Wasser Energie Luft* 4: 297-302.
- GRAZZINI F., 2007. Predictability of a large-scale flow conducive to extreme precipitation over the western Alps. *Meteorol. Atmos. Phys.* 95: 123-138.
- HORTON P., JABOYEDOFF M. & METZGER R., 2009. Extreme hydrometeorological events in the Swiss Alps linked with air mass trajectories. EGU abstract, Copernicus.
- HORTON P., JABOYEDOFF M., METZGER R., OBLED C. & MARTY R., 2011. Spatial relationship between the global atmospheric circulation and the rainfall measured in the Swiss Alps by means of the Analogs method. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 777-784, doi:10.5194/nhess-12-777-2012, 2012.
- KALNAY E., KANAMITSU M., KISTLER R., COLLINS W., DEAVEN D., GANDIN L., IREDELL M., SAHA S., WHITE G. & WOOLLEN J., 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *B. Am. Meteorol. Soc.* 77: 437-471.
- LORENZ E., 1969. Atmospheric Predictability as Revealed by Naturally Occurring Analogues. *J. Atmos. Sci.* 26: 636-646.
- MARSIGLI C., BOCCANERA F., MONTANI A. & PACCAGNELLA T., 2005. The COSMO-LEPS mesoscale ensemble system: validation of the methodology and verification, *Nonlinear Processes in Geophysics* 12: 527-536.
- MARTIUS O., ZENKLUSEN E., SCHWIERZ C. & DAVIES H. C., 2006. Episodes of alpine heavy precipitation with an overlying elongated stratospheric intrusion: a climatology. *Int. J. Climatol.* 26: 1149-1164.
- MARTIUS O., SCHWIERZ C. & DAVIES H. C., 2008. Far-upstream precursors of heavy precipitation events on the Alpine south-side. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* 134:417-428.

- MARTY R., ZIN I., OBLED C., BONTRON G. & DJERBOUA A., 2012. Towards Real-Time Daily PQPF by an Analog Sorting Approach. Application to Flash Flood Catchments. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 51: 505–520.
- MASSACAND A., WERNLI H. & DAVIES H., 1998. Heavy precipitation on the alpine southside: An upper-level precursor. *Geophys. Res. Lett.* 25: 1435–1438.
- MATHESON J. & WINKLER R., 1976. Scoring Rules for Continuous Probability Distributions. *Management Science* 22: 1087–1096.
- MONTANI A., CAPALDO M., CESARI D., MARSIGLI C., MODIGLIANI U., NEROZZI F., PACCAGNELLA T., PATRUNO P. & TIBALDI S., 2003. Operational limited-area ensemble forecasts based on the Lokal Modell, *ECMWF Newsletter* 98: 2–7.
- OBLED C., BONTRON G. & GARÇON R., 2002. Quantitative precipitation forecasts: a statistical adaptation of model outputs through an analogues sorting approach. *Atmos. Res.* 63: 303–324.
- Plaut G., Schuepbach E. & Doctor M., 2001. Heavy precipitation events over a few Alpine sub-regions and the links with large-scale circulation, 1971–1995, *Clim. Res.* 17: 285–302.
- STEPPELER J., DOMS G., SCHÄTTLER U., BITZER H., GASSMANN A., DAMRATH U. & GREGORIC G., 2003. Meso-gamma scale forecasts using the nonhydrostatic model LM, *Meteorology and Atmospheric Physics* 82: 75–96.
- TWELES S. & WOBUS H. B., 1954. Verification of prognostic charts. *B. Am. Meteorol. Soc.* 35: 455–463.