

DISTRIBUTION SPATIO-TEMPORELLE DES PRECIPITATIONS DE TYPE PMP UTILISANT UN MODELE DE CHAMP DE PLUIE : APPLICATION EN SUISSE

RECEANU R.¹, FALLOT J.-M.²

¹Hertig & Lador SA, CH-1176 St. Livres, ++41 (0)76 348 83 12, receanuramona@gmail.com

²Institut de géographie et durabilité, Université de Lausanne, CH-1015 Lausanne, +41(0)21 692 43 36, Jean-Michel.Fallot@unil.ch

Résumé – Les précipitations maximales probables (PMP) représentent les pluies extrêmes les plus élevées raisonnablement possibles (période de retour d'environ 10'000 ans) qui sont notamment utilisées pour dimensionner des barrages contre des crues extrêmes. En Suisse, ces précipitations sont représentées sous forme des cartes avec une résolution horizontale de 2 km. Cet article présente la méthode nécessaire pour utiliser les cartes de type PMP dans le but final d'estimer la crue maximale probable (PMF) pour les barrages. Cette méthode a été développée suite aux problèmes rencontrés avec une application inadéquate des PMP. Ces problèmes peuvent être résolus par la distribution spatio-temporelle des PMP avec une résolution affinée conservant les données physiques. La conception de la méthode de distribution spatio-temporelle des précipitations se base sur la création de champ de pluie. Cette méthode a été validée en s'appuyant sur des événements extrêmes de type supercellulaire et confirme la possibilité de reproduire des structures réelles de pluie en utilisant un algorithme de champ de pluie.

Mots-clés : Précipitations maximales probables (PMP), champ de pluie, supercellule, modèle, distribution des précipitations.

Abstract – *Spatio-temporal distribution of extreme precipitation (PMP) using rain field model : application in Switzerland.* Probable Maximum Precipitation (PMP) represents the extreme rainfall that is the highest reasonably possible value (minimal return period about 10'000 years) used to decide on the size of dams in the case of extreme floods. In Switzerland these precipitation values are represented in the form of maps with a horizontal resolution of 2 km. This article presents the required methodology to use the PMP maps with the final goal of estimating the Probable Maximum Flood (PMF) for dams. This method was developed following problems encountered through the inadequate application of the PMP. These problems can be solved by the spatio-temporal distribution of the PMP with a fine resolution conserving the physical data. The design of the method is based on the creation of the rain field. This method was validated by using extreme events of supercellular type and confirms the possibility of reproducing real rain structure by using an algorithm based on rain field.

Keywords: Probable maximum precipitation (PMP), rain field, supercell, model, rainfall distribution

Introduction

Les précipitations et crues extrêmes ont fait l'objet de nombreuses études, car leurs intensités tendent à augmenter avec le réchauffement global du climat (IPPC, 2013). Elles peuvent être calculées à l'aide de méthodes statistiques et déterministes. Les valeurs des précipitations extrêmes peuvent être estimées à partir des analyses statistiques effectuées sur des séries de mesures pluviométriques d'une certaine durée (Fallot et Hertig, 2013). Ces méthodes se sont constamment améliorées, mais certains points faibles restent encore impossibles à résoudre, comme la forme entière d'un hydrogramme de crue (Receanu, 2013). Cela justifie le développement de méthodes déterministes.

L'estimation des précipitations extrêmes utilisant les méthodes déterministes consiste à représenter par des lois analytiques les phénomènes atmosphériques responsables des précipitations. Ces méthodes sont valables seulement si la modélisation des phénomènes est « réaliste » au sens où elle doit tenir compte des phénomènes prépondérants sollicités par les précipitations extrêmes et utiliser des méthodes de résolution adéquate. Parmi les méthodes déterministes, la méthode PMP (Probable Maximum Precipitation) est la plus utilisée pour calculer les précipitations maximales probables sur un bassin versant donné. Cette méthode

offre une alternative intéressante aux méthodes statistiques, qui présentent des lacunes (Bérod, 1994).

La méthodologie proposée en Suisse pour calculer les précipitations extrêmes de type PMP tient compte des mécanismes de type orographique et convectif. Elles sont calculées en utilisant un modèle météorologique pour les précipitations orographiques et la méthode de Haiden (1991) pour les pluies convectives. Les résultats finaux des deux approches sont présentés sous forme de cartes de type PMP pour différentes durées de la pluie (1, 3, 6, 9, 12 et 24 heures) avec une résolution horizontale de 2 km sur l'ensemble de la Suisse. Ces résultats ont été validés sur la base de mesures in situ pour des durées de 24 heures et 3 heures (Audouard et al., 2006).

Ces PMP peuvent être utilisées pour calculer des crues extrêmes probables (PMF) en Suisse selon la méthode PMP-PMF (OFEN/OFEG, 2003). Toutefois, une utilisation inadéquate de ces PMP peut conduire à des calculs de crues trop élevées et irréalistes (Receanu, 2013). Pour cette raison, un modèle de distribution spatio-temporelle des précipitations extrêmes a été développé et il est présenté dans cet article.

1. Distribution des précipitations extrêmes

1.1 Modèle mathématique

La méthode développée est basée sur la création de « champ de pluie » en donnant leurs intensité, vitesse et direction de déplacement. Au cœur du modèle de calcul se trouve une équation d'advection-diffusion (Brutsaert, 1974 cité par Jinno et al., 1993). Cette équation a été modifiée pour inclure la direction du vent sous forme d'un vecteur de vitesse décomposé sur les deux axes x et y (Receanu, 2013). Par rapport à l'équation de Jinno, où la zone de pluie se déplace toujours dans la « direction de déplacement de l'orage », la direction de déplacement devient une composante explicite dans l'équation. Il s'agit d'une contribution importante, car elle permet d'introduire aussi des variations spatio-temporelles dans la structure du vent, ou même de spécifier un champ vectoriel du vent différent à tout moment de la simulation.

La forme finale de l'équation modifiée est la suivante :

$$P(x, y) = \frac{I}{4\pi(D_x D_y)^{\frac{1}{2}}(t - t_0)} \exp \left\{ -\frac{[x - x_0 - v_x(t - t_0)]^2}{4D_x(t - t_0)} - \frac{[y - y_0 - v_y(t - t_0)]^2}{4D_y(t - t_0)} - \gamma(t - t_0) \right\}$$

v_x, v_y = vitesse d'advection de la cellule de précipitations dans la direction du déplacement en m/min ; D_x, D_y = coefficients de diffusion en x et respectivement en y en m^2/s ; γ = coefficient de développement/dissipation de l'intensité en min^{-1} , T = temps d'occurrence de la cellule en min., I = intensité des précipitations.

À partir de cette équation, l'intensité de la pluie peut être prédite à tout moment et sur tous les points du domaine de calcul.

Le comportement du champ de pluie du modèle passe par deux phases : l'advection et la diffusion. Initialement, à sa formation, le champ de pluie a une taille réduite, avec une intensité relativement élevée autour du centre. En se déplaçant, sa taille augmente en même temps que l'intensité de la pluie, jusqu'au moment où celle-ci atteint son intensité maximale. Puis, la taille du champ de pluie continue d'augmenter, mais l'intensité commence à diminuer (Figure 1 – partie droite).

La pluie est structurée de manière à garantir la cohérence physique du volume donné par une pluie mesurée ou de type PMP dans le temps et dans l'espace. La figure 2 montre un

exemple avec 6 champs de pluie modélisés pour un bassin versant préalpin dans le Nord-Est de la Suisse (Sitter).

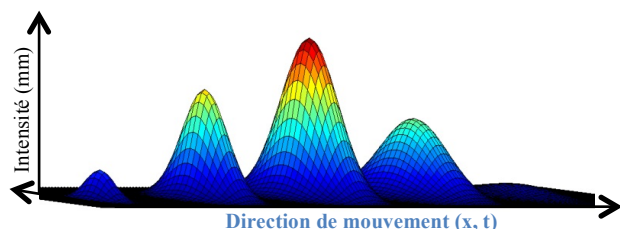


Figure 1. Évolution du champ de pluie à quatre instants de temps différents sur la surface (x,y). Les couleurs représentent l'intensité de la pluie (mm/h).

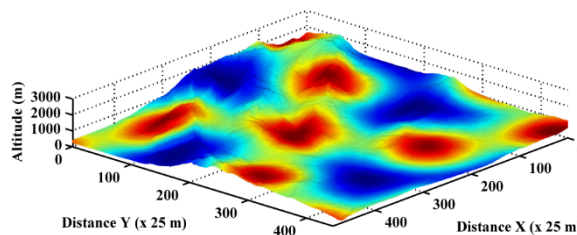


Figure 2. Position initiale des champs de pluie (les couleurs jaune-rouge) sur le terrain pour le bassin versant de la Sitter, Suisse

Le vent déplace ces champs de pluie sur le terrain et ils peuvent même sortir du domaine. Dans ce cas, on suppose qu'un champ de pluie identique entre dans le domaine sur le côté opposé et remplace le champ de pluie disparu (condition de bord cyclique).

1.2 Traitement des images radar

Le modèle de distribution spatio-temporelle des précipitations extrêmes et la taille des champs de pluie ont été validés à partir d'analyses d'images radar pour des orages supercellulaires en Suisse, car ils génèrent les averses les plus intenses. Les orages supercellulaires du 18 juillet 2005 ont été choisis ici pour effectuer une validation du comportement global du modèle, car il s'agit d'un événement extrême de courte durée pour lequel il existe des données spatio-temporelles de précipitations de bonne qualité (Peyraud, 2013). Ces données sont des images radar brutes ayant un pas de temps de 5 minutes pendant 24 heures (Figure 3). Les précipitations mesurées par les images radar ont été comparées avec celles enregistrées par 5 stations météorologiques traversées par cette supercellule (Figure 8). Les intensités maximales des précipitations mesurées sur 10 minutes par les stations de Genève-Cointrin et de Payerne (11.5 et 0.8 mm) lors du passage de cette supercellule sont proches de celles obtenues avec le radar (14.0 et 0.9 mm). Par contre, les intensités maximales des précipitations mesurées par les stations de Nyon, Pully et du Moléson sont environ 2 fois plus basses que celles du radar. Les pluviomètres peuvent sous-estimer les précipitations en cas de violents orages avec de la grêle et des vents forts et les images radar contiennent aussi des approximations (Peyraud, 2013). Après cette vérification, les images radar brutes ont dû être corrigées, afin de pouvoir les utiliser pour la validation du modèle.

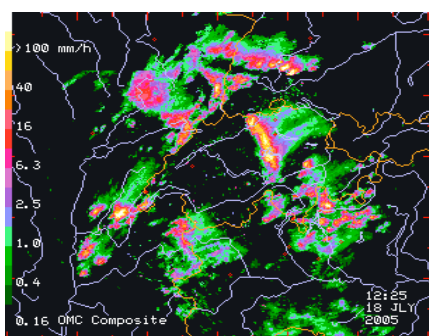


Figure 3. Image radar des orages supercellulaires du 18.07.2015 dans la région des Alpes (MeteoSuisse)

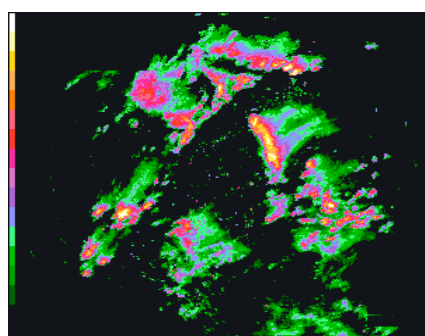


Figure 4. Image radar numérique des orages supercellulaires du 18.07.2015 après correction

Une première correction a été réalisée pour enlever les rivières (en bleu clair) et les frontières des pays (en orange), ainsi que tout le texte (en blanc). Après cette étape, les couleurs représentant l'intensité de la pluie restent, mais des trous subsistent dans les champs

de pluie (moins de 5% des points sur la zone d'intérêt). Pour la deuxième correction, ces trous ont été remplis par une interpolation linéaire (Figure 4), sans changer les valeurs des autres points. Enfin, l'échelle des intensités des pluies a été reconstituée en utilisant une échelle exponentielle et en associant à chaque couleur de la carte l'intensité qui convient. Les résultats sont présentés dans les figures 5 à 7, avec des images détaillées de la supercellule qui a traversé le Sud-Ouest de la Suisse durant l'après-midi du 18 juillet 2015.

Ces figures révèlent que la supercellule est d'abord composée de deux cellules (Figure 5) qui ensuite s'agrandissent jusqu'à ne former qu'une seule cellule (Figure 6). Après un certain temps, elle commence à se diviser en plusieurs cellules avec une taille plus petite (Figure 7). L'intensité de la pluie diminue avec le déplacement des champs de pluie.

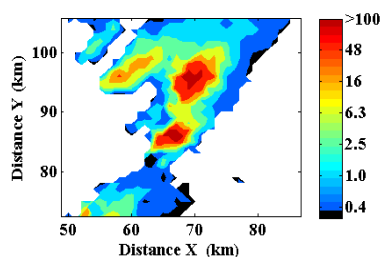


Figure 5. La supercellule à 15h00

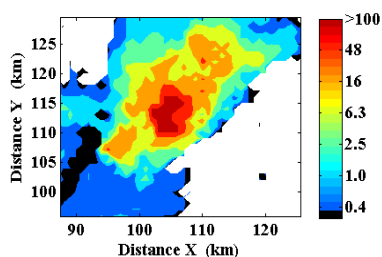


Figure 7. La supercellule à 16h00

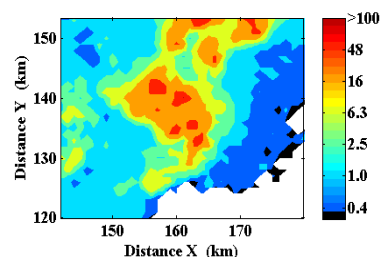


Figure 8. La supercellule à 17h25

2. Validation du modèle à l'aide d'un épisode d'orage supercellulaire

Les hydrogrammes obtenus à partir des images radar ont été utilisés pour calibrer et valider le modèle des champs de pluie. La calibration a comme but de trouver les paramètres limite de l'équation d'advection-diffusion. L'étape de validation prévoit de reproduire les mêmes structures de pluie retrouvées sur les images radar avec le modèle.

Les paramètres inclus dans l'équation d'advection diffusion ont été ajustés pour reproduire l'orage supercellulaire du 18 juillet 2005 qui a traversé le Sud-Ouest de la Suisse (lac Léman). Il s'agit du nombre des champs de pluie, de leur géométrie, de leur amplitude maximale et de leur vitesse de déplacement. La validation de ces paramètres a été faite par la comparaison des résultats obtenus entre le modèle de distribution de la pluie et les images radar.

Pour reproduire le comportement de la supercellule, les nombres des champs de pluie imposés dans le modèle de distribution ont été choisis à partir des images radar (Figure 5-couleur rouge). Les champs de pluie donnés par l'équation d'advection-diffusion ont la forme d'une gaussienne bidimensionnelle. Les deux variances initiales allongées spatiales de cette gaussienne ont été choisies pour donner aux champs de pluie une forme qui se rapproche de celles illustrées sur les images radar. Ensuite, ces champs de pluie (dans ce cas deux) ont reçu des coordonnées correspondant à la position initiale de départ en dehors de la Suisse, de manière à reproduire la forme des champs de pluie observée quand ils passent au-dessus du lac Léman.

L'ampleur maximale de la pluie a été fixée à 160 mm/h, valeur mesurée le 18 juillet 2005. Enfin, le dernier paramètre important dans le développement de champs de pluie avec des orages supercellulaires est le vent. Un champ vectoriel de vent distribué spatialement a été calculé pour l'ensemble de la Suisse, à partir de la vitesse mesurée de 18 m/s par le radiosondage de Payerne à une altitude de 2500 m/mer. Ce calcul a été réalisé avec un modèle atmosphérique 3D et hydrodynamique (Hertig, 2003 ; Audourd et al., 2006). Ces résultats ont été intégrés dans le modèle de distribution de la pluie.

Une fois ces paramètres établis, il a fallu vérifier si les champs de pluie développés arrivent à suivre la trajectoire de la supercellule durant la période étudiée. Pour cela, les

champs de pluie créés à l'aide de l'équation d'advection diffusion (en rouge-jaune) ont été superposés sur les champs de pluie obtenus à partir des images radar (en rose) sur toute la durée de la supercellule. La figure 8 montre cette superposition pour trois moments. Les résultats obtenus montrent un bon accord entre les champs de pluie développés par le modèle et ceux reconstitués à partir de données réelles (images radar).

La bonne correspondance obtenue entre le vrai champ de pluie supercellulaire et le modèle d'advection diffusion permet de calculer les hyétogrammes de pluie. Ils ont été calculés sur plusieurs points du terrain pour pouvoir ensuite les comparer avec ceux de l'épisode du 18 juillet 2005. Seuls les hyétogrammes de deux points sur la trajectoire de la supercellule sont présentés ici (Figures 9 à 10).

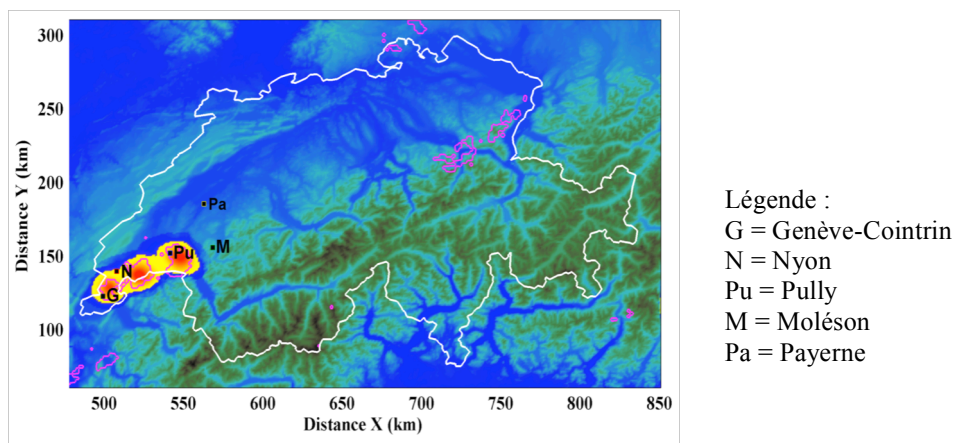


Figure 8. Superposition à trois moments de temps différents du déplacement des champs de pluie calculés par le modèle (zones jaunes-rouges) et ceux déterminés à partir des images radar (contours en rose).

Les hyétogrammes obtenus montrent une bonne correspondance entre la distribution de la pluie calculée et les images radar. Ces images révèlent que cet orage supercellulaire n'a produit des précipitations intenses que sur une courte durée, avec une intensité maximale de la pluie de 160 mm/h mesurée par le radar pendant 5 minutes.

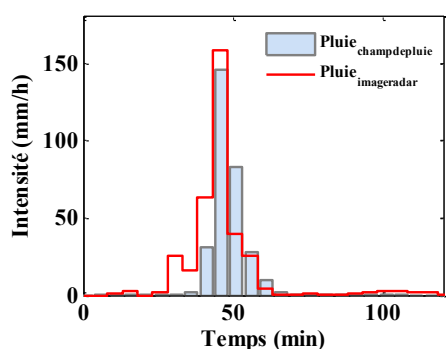


Figure 9. Hyétogrammes de pluie calculé par le modèle en bleu clair et mesuré par les images radar en rouge [x = 539 km, y = 151 km]

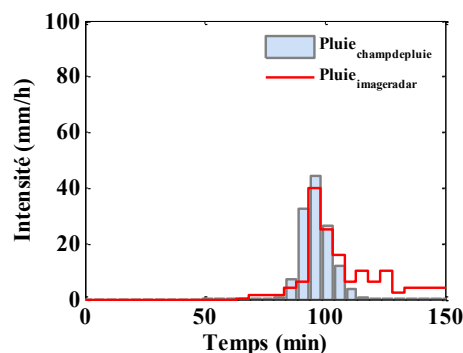


Figure 10. Hyétogrammes de pluie calculé par le modèle en bleu clair et mesuré par les images radar en rouge [x = 569 km, y = 169 km]

Cette bonne correspondance montre que le modèle de champ de pluie présenté ici est capable de reproduire des structures de pluies extrêmes réalistes et qu'il peut être utilisé pour distribuer une PMP dans l'espace et dans le temps. De bons accords ont également été obtenus entre les structures de pluie mesurées et celles simulées avec ce même modèle pour d'autres épisodes et pour d'autres bassins versants en Suisse (Receanu, 2013).

Un modèle hydrologique a ensuite été développé pour calculer des crues extrêmes réalistes dans des bassins versants alpins à partir de pluies extrêmes (PMP) distribuées selon la méthode présentée ici. Ce modèle hydrologique a également été validé pour plusieurs événements extrêmes mesurés (Receanu, 2013).

Conclusion

Cet article présente les bases théoriques de la méthode de distribution spatio-temporelle de la pluie de type PMP, ainsi qu'une validation de cette méthode pour des orages supercellulaires. Une distribution spatio-temporelle des pluies extrêmes est nécessaire pour calculer des crues extrêmes réalistes dans un bassin versant à partir de la carte des PMP de la Suisse (Receanu, 2013). La structure de ces pluies et les vents influencent les hydrogrammes de crues et le débit de pointe à l'exutoire d'un bassin (Receanu et al., 2013).

La pluie est distribuée à l'aide d'une équation d'advection-diffusion dans laquelle une composante de la direction de vent a été introduite, dans le but de pouvoir utiliser un champ vectoriel de vent calculé avec un modèle météorologique. La validation du modèle de champ de pluie a été réalisée sur des épisodes extrêmes avec des orages supercellulaires à partir des images radar fournies par MeteoSuisse. Les hyétogrammes calculés par le modèle de champ de pluie sont proches de ceux obtenus à partir du traitement des images radar pour ces épisodes extrêmes, ce qui prouve que ce modèle est capable de reproduire des structures de pluie réalistes. Toutefois, les intensités de pluie calculées par ce modèle sont tributaires de celles mesurées par les radars (ou les pluviomètres).

Bibliographie

- Audouard A., Hertig J.-A., Fallot J.-M., 6-9 juill. 2006. Modélisation des précipitations extrêmes en Suisse. *Actes du 19^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC)*, 6-9 septembre 2006 (pp. 83-88). Epernay, France.
- Bérod D., 1994. *Contribution à l'estimation des crues rares à l'aide de méthodes déterministes. Apport de la description géomorphologique pour la simulation de processus d'écoulement* (Thèse de doctorat 1319). École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.
- Brutsaert W., 1974. More on an approximate solution for nonlinear diffusion. *Water Resources Research*, **10**, 1251-1252.
- Fallot J.-M., Hertig J.-A., 2013. Détermination des précipitations extrêmes en Suisse à l'aide d'analyses statistiques et augmentation des valeurs extrêmes durant le 20^e siècle. *Mém. Soc. Vaud. Sc. Nat.*, **25**, 13-24
- Haiden T., 1991. *A deterministic approach to the determination of orographic PMP*. Institute of Meteorology and Geophysics, University of Vienna, Austria.
- Hertig J.-A., 2003. Some indirect scientific paternity of Alan G. Davenport. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **91**, 1329-1347.
- IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 1535 p
- Jinno K., Kawamura A., Berndtsson R., Larson M., Niemczynowicz J., 1993. Real-time rainfall prediction at small space-time scales using a two-dimensional stochastic advection-diffusion model. *Water Resources Research*, **29**, 1489-1504.
- OFEN/OFEG, 2003. *Evaluation des crues dans les bassins versants de Suisse*. Rapport de l'Office fédéral de l'Energie (OFEN) et de l'Office fédéral des Eaux et de la Géologie (OFEG). Berne, 114 p.
- Peyraud L., 2013. Analysis of the 18 July 2005 Tornadoic Supercell over the Lake Geneva Region. *AMS Journals Online - Weather and Forecasting*, **28**, 1524-1551.
- Receanu R. R., 2013. *Simulation fine des précipitations et des crues extrêmes. Application aux petits bassins versants alpins non glaciaires* (Thèse de doctorat). Université de Lausanne, Suisse.
- Receanu R. R., Hertig J.-A., Fallot J.-M., 2013. Modélisation hydrologique des précipitations et des crues extrêmes dans les bassins versants alpins. *Mém. Soc. Vaud. Sc. Nat.*, **25**, 25-44.