

ESTIMATION DE LA PLUIE PAR SIMULATION CONDITIONNELLE UTILISANT DES MESURES PROVENANT DE DIFFÉRENTS INSTRUMENTS DE MESURE

TOMA A¹, HUBERT P².

RÉSUMÉ

De nombreuses méthodes déterministes ou statistiques ont été imaginées pour interpoler les différents types de mesures concernant la pluie (pluviographe, radar, satellite, ...). Nous présentons ici une méthode alternative - la simulation conditionnelle - utilisant des données recueillies par un radar et des pluviographes.

La technique de simulation conditionnelle comporte deux étapes :

- construire une simulation non conditionnelle, c'est-à-dire une réalisation d'un modèle probabiliste représentant la structure à petite échelle du champ étudié. C'est ainsi que la méthode des bandes tournantes permet de simuler un champ dont on connaît la moyenne et le variogramme ;
- conditionner cette simulation par rapport aux points de mesure. Dans cette étape, tout en gardant la structure à petite échelle, on modifie les valeurs du champ pour retrouver les valeurs mesurées aux points de mesure.

Dans notre modèle, la simulation non conditionnelle est construite à partir des données du radar, et le champ ainsi obtenu est ensuite conditionné par rapport aux mesures pluviographiques. Nous donnerons un exemple d'application et envisagerons quelques possibilités d'amélioration du modèle.

¹CIG, École des Mines de Paris.

²URA CNRS 1367, CIG, École des Mines de Paris.

INTRODUCTION

Le problème que nous traitons ici est l'estimation de la pluie en utilisant des mesures de natures différentes. Les caractéristiques principales des deux types de mesure sont les suivantes :

- la mesure pluviographique est une mesure directe, relativement précise, pratiquement ponctuelle en espace et connue pour un nombre de points relativement limité ;
- la mesure radar est une mesure indirecte, peu précise, intégrée en espace sur des mailles allant généralement de 0,01 à 15 km², et connue pratiquement partout dans l'espace.

Il paraît évident que ces caractéristiques complémentaires des deux mesures doivent permettre une amélioration sensible des estimations si on les utilise conjointement plutôt qu'indépendamment. Les modèles utilisés peuvent être classés en deux catégories :

Modèles déterministes :

- calibration du radar par un facteur multiplicatif constant sur l'image (WILSON, 1970 ; ANDRIEU, 1986 ; BLANCHET, 1993) ;
- interpolation spatiale du facteur de calibration (BRANDES, 1975 ; ANDRIEU, 1986) ;
- correction des effets de bande brillante en modélisant des profils verticaux de réflectivité (CREUTIN *et al.*, 1991).

Modèles statistiques :

- filtres de Kalman (AHNERT *et al.*, 1986) ;
- analyse multivariée (ou objective). Cette méthode utilise une régression multivariable, dont les coefficients sont estimés à partir de fonctions de structure (covariances et covariances croisées, EDDY 1979, CRAWFORD 1979) ;
- méthodes d'origine géostatistique : différents types de cokrigage : simplifié (CREUTIN *et al.* 1988), linéaire (SEO *et al.* 1990) ou disjonctif (AZIMI-ZOONOZ *et al.*, 1989) ;
- approche bayésienne, qui est une généralisation de l'approche précédente : certains paramètres statistiques (moyennes, variances, covariances, ...) sont traités comme inconnus (SEO et SMITH 1991).

Toutes ces méthodes sont des interpolations. Dans d'autres domaines (évaluation des ressources, hydrogéologie), on utilise aussi des méthodes de simulation. Nous présentons ici les principes généraux des méthodes de simulation, en commençant par les simulations non conditionnelles, en continuant avec le conditionnement d'une simulation non conditionnelle, et nous finirons avec un exemple simple de simulation conditionnelle que nous avons testé sur des données synthétiques.

SIMULATION NON CONDITIONNELLE

Une simulation non conditionnelle est une réalisation d'un modèle probabiliste, qui pourrait être la réalité (inconnue faute de mesures). Pour que cette réalisation présente de l'intérêt, il faut bien sûr que le modèle probabiliste soit compatible avec la réalité et que ses paramètres soient calés à partir de mesures. Un exemple de simulation non conditionnelle est la simulation de données de pluie à l'extérieur du recouvrement convexe des points de mesure, utilisé par KOTTEGODA et KASSIM (1991) pour déterminer le mouvement d'un orage. Pour simuler un champ par la méthode des bandes tournantes, ils supposent que la variable à simuler est gaussienne, et que la moyenne et la covariance (ou le variogramme) sont connues. Un autre exemple est la simulation non conditionnelle que nous utilisons au paragraphe 5 : en appliquant une cascade multiplicative à un pixel de 1 km x 1 km, nous construisons des vérités sol possibles à une échelle de 125 m x 125 m.

En fait, une telle simulation est conditionnée par rapport aux données radar, car la moyenne sur le « grand » pixel est préservée pour un grand nombre de réalisations.

L'avantage des simulations est la possibilité d'avoir des « vérités sol » moins lissées que celles généralement fournies par les méthodes d'interpolation, ce qui peut être important si le champ simulé est par la suite utilisé par un modèle non linéaire comme c'est souvent le cas en hydrologie. L'inconvénient immédiat est qu'on dispose aussi de points de mesure pour la variable simulée, et qu'on aimerait bien retrouver les valeurs mesurées aux points de mesure, comme dans le cas des interpolations (figure 1a).

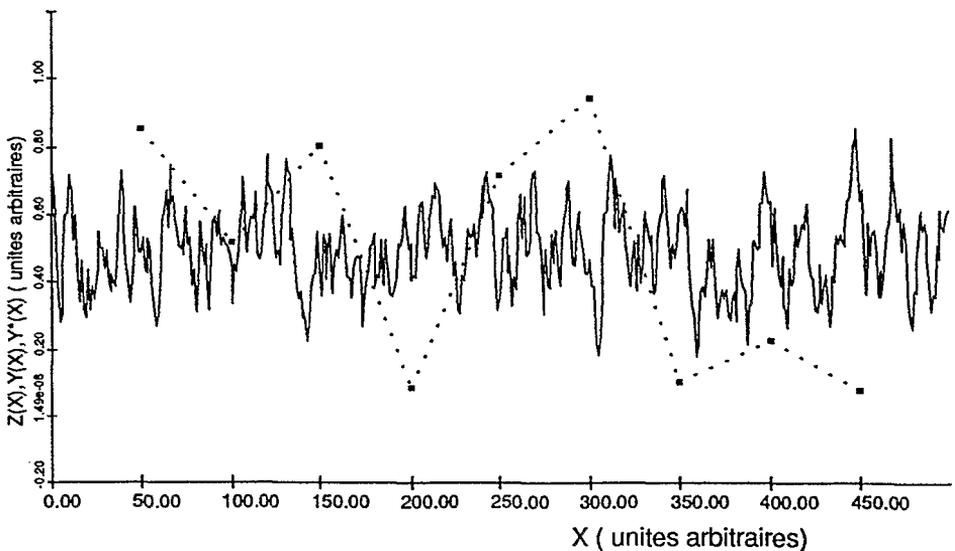


Figure 1a :
Exemple fictif de points de mesure, interpolation (trait interrompu) et simulation non conditionnelle (trait continu).

SIMULATION CONDITIONNELLE

Nous décrivons ici de façon très simple la simulation conditionnelle ; pour plus de détails, le lecteur pourra consulter par exemple (JOURNEL, 1974), un des premiers ouvrages sur les simulations conditionnelles. Soit Z la variable « réelle », connue seulement aux points de mesure X_i , et Y la simulation non conditionnelle. On notera respectivement $Z_i = Z(X_i)$ et $Y_i = Y(X_i)$ les valeurs prises par Z et Y aux points de mesure X_i . On se propose alors de construire une nouvelle variable Y^* telle que $Y^*_i = Z_i$ et que la structure de Y^* soit identique à celle de Y . Ceci peut être réalisé par une correction additive :

$$Y = Y + T$$

telle que le champ T ait une structure assez « lisse » pour conférer la même structure fine à Y^* et à Y , et que la valeur de T aux points de mesure soit :

$$T_i = Z_i - Y_i.$$

Le champ T est obtenu par l'interpolation des valeurs $T_i = Z_i - Y_i$ par une méthode d'interpolation quelconque. De même, si des raisons physiques laissent supposer qu'une correction multiplicative serait plus pertinente, on peut l'obtenir en effectuant les calculs décrits ci-dessus avec les logarithmes des variables.

La figure 1b présente une simulation conditionnelle obtenue en conditionnant la simulation non conditionnelle (figure 1a) par rapport aux points de mesure.

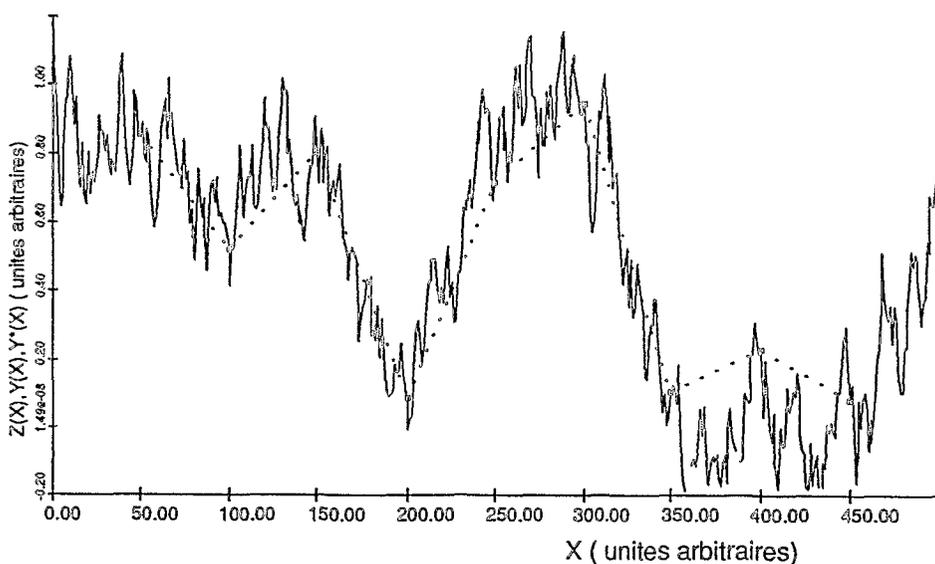


Figure 1b :

Points de mesure, interpolation et simulation conditionnelle, obtenus en conditionnant la simulation non conditionnelle présentée dans la figure 1a.

L'avantage des simulations conditionnelles est la possibilité de construire plusieurs simulations passant par les points de mesure, et donc une approximation de la densité de probabilité de la variable estimée par le modèle (dans notre cas, le cumul de pluie). Bien que pour certaines méthodes d'interpolation telles que le (co)krigeage on puisse en principe déterminer des intervalles de confiance, ceci devient impossible pour certaines estimations non linéaires (BARRANCOURT *et al.*, 1992). De plus, si par la suite la pluie est l'entrée d'un modèle non linéaire pluie-débit, la méthode des simulations conditionnelles permet en principe d'établir des intervalles de confiance pour les prévisions de débit.

DONNÉES UTILISÉES POUR TESTER LE MODÈLE DE SIMULATION

Pour tester notre modèle de simulation conditionnelle nous avons besoin de :

- données de base, servant à la procédure d'estimation : image radar et mesures pluviographiques ;
- des valeurs de référence (vérité sol), à la même échelle que les estimations, servant à une comparaison.

Les données dont nous disposons dans cette étape de développement de nos recherches sont seulement des données radar de bonne qualité (1km x 1km), calibrées à l'aide de mesures pluviographiques (BLANCHET, 1993) dont nous ne disposons pas. Nous avons décidé de construire une « vérité sol » plausible à une échelle pour laquelle un pluviographe peut être considéré comme représentatif (125 m x 125 m). Pour cela nous avons utilisé un modèle de cascade multiplicative (SCHERTZER et LOVEJOY, 1989).

À partir de la vérité sol, nous simulons un passage radar simplifié, comprenant l'introduction d'une erreur systématique, et le résultat de ce passage radar et les données pluviographiques extraites de la vérité sol à l'échelle 125 m x 125 m, constituent les données de base. L'ensemble de la démarche de constitution d'une banque de données plausibles utilisant des données réelles est décrite en détail dans TOMA (1993).

APPLICATION À L'ESTIMATION DE LA PLUIE EN UTILISANT DES DONNÉES RADAR ET PLUVIOGRAPHIQUES

Les données utilisées sont des réflectivités radar sur des pixels de 1 km x 1 km, et des mesures pluviographiques supposées être représentatives à une échelle d'espace de l'ordre d'un hectare.

La procédure mise en oeuvre (appliquée aux logarithmes des champs) est la suivante :

- conversion des réflectivités radar en intensités de pluie, grâce à la relation de Marshall-Palmer (MP), à l'échelle de 1 km x 1km. Pour l'instant les paramètres de la loi MP sont constants, mais on peut envisager le tirage au sort de ces paramètres à partir d'une distribution de probabilité donnée ;

- passage à l'échelle 125 m x 125 m en utilisant trois étapes de cascade multiplicative. Ceci constitue la simulation non conditionnelle Y ;
- calcul, sur l'ensemble des mailles où il pleut effectivement ($Y > 0$), du champ $\log T$, obtenu en interpolant les valeurs $\log Z_i - \log Y_i$ (Z_i - mesures, Y_i - valeurs simulées aux points de mesure). L'interpolation est faite par pondération proportionnelle à l'inverse du carré de la distance ;
- calcul de la simulation conditionnelle $\log Y^* = \log Y + \log T$.

Cette procédure a été appliquée pour une seule fenêtre de 15 km x 15 km x 15 minutes, et 500 simulations conditionnelles ont été réalisées. Quelques résultats (histogrammes des estimations pour un pixel fixé) sont présentés sur la figure 2.

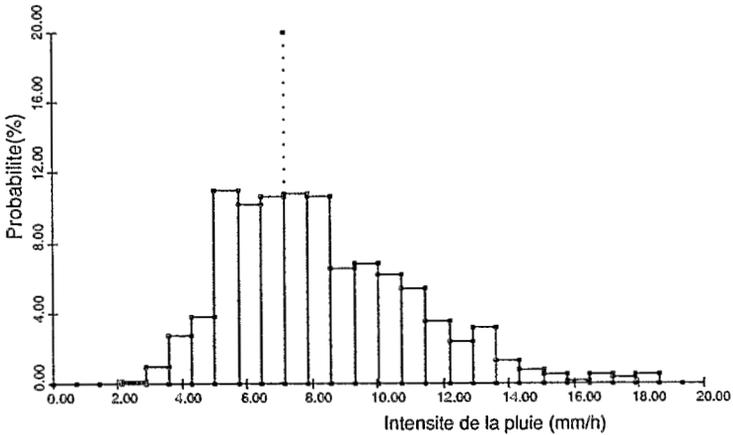


Figure 2a :

Exemple de résultat du modèle de simulation conditionnelle : histogramme des estimations. Le trait interrompu vertical représente la vraie valeur (7,17 mm/h).

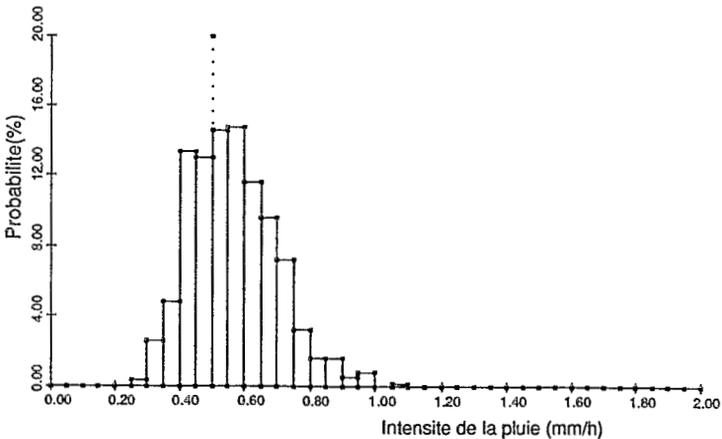


Figure 2b :

Exemple de résultat du modèle de simulation conditionnelle : histogramme des estimations. Le trait interrompu vertical représente la vraie valeur (0,50 mm/h).

CONCLUSION

La possibilité d'appliquer les simulations conditionnelles à l'estimation de la pluie en utilisant différents types de mesure nous paraît attirante car :

- la simulation non conditionnelle préalable permet d'utiliser les données radar avec des hypothèses peu contraignantes sur les paramètres de la loi de Marshall-Palmer, évitant aussi la difficile inférence des covariances croisées ;
- la méthode fournit des intervalles de confiance des estimations.

Nous envisageons d'apporter quelques améliorations à cette méthode (prise en compte du caractère aléatoire des paramètres de la loi de Marshall-Palmer, tirage au sort de la « vraie valeur » de la pluie sur le pixel en partant de la distribution jointe de cette valeur et d'une mesure ponctuelle - pluviographe - recueillie sur le même pixel, etc.). Il faut cependant être conscient que les erreurs systématiques de la mesure radar (échos de sol, bande brillante) ne peuvent pas être éliminées par cette méthode. De même, des cas où le radar n'enregistrerait pas de pluie et où le pluviographe mesure une pluie non nulle nécessiterait un traitement spécial.

BIBLIOGRAPHIE

- AHNERT P.R., KRAJEWSKI W.F., JOHNSON E.R. (1986). Kalman filter estimation of radar - rainfall field bias, Preprints of the 23rd conference of radar meteorology and the conference on clouds physics, AMS, Boston, Mass., JP33-JP37.
- ANDRIEU H., (1986). Interprétation de mesures du radar Rodin de Trappes pour la connaissance en temps réel des précipitations en Seine-Saint-Denis et Val-de-Marne, *thèse de doctorat de l'ENPC*.
- AZIMI-ZOONOZ A., KRAJEWSKI W.F., BOWLES D.S., SEO D.J., (1989). Spatial rainfall estimation by linear and non-linear co-kriging of radar-rainfall and raingage data, *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 3, 51-67.
- BARRANCOURT C., CREUTIN J.D., RIVOIRARD J., (1992). A method for delineating and estimating rainfall fields, *Water Resour. Res.*, vol. 28, no. 4, 1133-1144.
- BLANCHET F., (1993). Élaboration d'une mesure de référence de la lame d'eau en hydrologie urbaine, *thèse de doctorat de l'Université Paris XIII*, 285 p.
- BRANDES E. A., (1975). Optimizing rainfall estimates with the aid of radar, *J. Appl. Meteorol.*, 14, 1339-1345.
- CRAWFORD K.C., (1979) - Considerations for the design of a hydrologic data network using multivariate sensors, *Water Resour. Res.*, 15, 1752-1762.
- CREUTIN J.D., DELRIEU G., LEBEL T., (1988). Rain measurement by raingage - radar combination : A geostatistical approach, *J. Atm. and Oceanic Tech.*, 5, 102-115.
- CREUTIN J.D., ANDRIEU H., DELRIEU G., (1991) Expérience radar Cévennes 86-88 : *Bilan et perspectives pour l'Hydrologie, rapport final de la subvention SRETIE/MRE no 88053*.

- EDDY A., (1979). Objective analysis of convective scale rainfall using gages and radar, *J. Hydrol.*, 44, 125-134.
- JOURNEL A., (1974). Simulation Conditionnelle. Théorie et Pratique, thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Nancy I.
- KOTTEGODA N. T., KASSIM A.H.M., (1991). The turning bands method with the fast-Fourier transform as an aid to the determination of storm movement, *J. Hydrol.*, 127, 55-69.
- SCHERTZER D., LOVEJOY S., (1989). Generalised scale invariance and multiplicative processes in the atmosphere, *Pageoph*, 130, 57-81.
- SEO D.J., KRAJEWSKI W.F., AZIMI-ZOONOZ A., BOWLES D.S., (1990). Stochastic Interpolation of Rainfall Data From raingages and Radar Using Cokriging, 1. Design of Experiments, *Water Resour. Res.*, 26, 469-477.
- SEO D.J., SMITH J.A., (1991). Rainfall estimation using raingages and radar. A Bayesian approach : 1. Derivation of the estimators, *Stochastic Hydrol. Hydraul.*, 5, 17-29.
- TOMA A., (1993). Variabilité spatio-temporelle des champs précipitants, rapport final de la subvention no. 92203, *rapport École des Mines/ SRETIE RD/76/93*.
- WILSON J.W., (1970). Integration of radar and raingage data for improved rainfall measurements, *J. Appl. Meteorol.*, 9, 489-497.