

QUELLE EST LA SENSIBILITÉ DE LA RÉGIONALISATION DES DÉBITS PAR VOISINAGE GÉOGRAPHIQUE À LA QUALITÉ DE L'INFORMATION PLUVIOMÉTRIQUE ?

BEN KHEDIRI W. ⁽¹⁾, DROGUE G. ⁽¹⁾

(1) Laboratoire LOTERR UFR SHS, Université de Lorraine, Île du Saulcy, 57045 Metz Cedex 1, [wiem.ben-khediri@univ-lorraine.fr]

Résumé– Evaluer la fiabilité et la robustesse d'une méthode de régionalisation des débits est crucial en hydrologie de surface. Dans cette optique, nous avons mené une étude de sensibilité dynamique de la méthode de régionalisation par voisinage géographique. Le modèle pluie-débit empirique GR4J a d'abord été calé avec le réseau pluviométrique complet et l'information hydrologique locale pour 148 pseudo-bassins non jaugés et leurs voisins. Le modèle est ensuite recalé en modifiant ses entrées de précipitation par sous-échantillonnage aléatoire du réseau pluviométrique. Les hydrogrammes régionalisés avant et après rééchantillonnage sont alors comparés aux débits observés. Les résultats montrent que la performance de la méthode de régionalisation est peu sensible à la qualité de l'information pluviométrique mais qu'un nombre minimum de pluviomètres (au moins 2 pluviomètres par bassin) est toutefois requis pour garantir, en moyenne régionale, un niveau de performance satisfaisant.

Mots-clés : régionalisation, étude de sensibilité dynamique, réseau de mesure pluviométrique, modèle hydrologique, bassin Rhin-Meuse

Abstract– Does a poor meteorological information lead to poor streamflow simulations in ungauged catchments? Assessing the reliability and robustness of a regionalization scheme is crucial in hydrology. In order to analyse the impact of the accuracy of rainfall inputs, we performed a dynamic sensitivity study. From the complete meteorological data set available for a target catchment and its neighbours, we calibrate the GR4J rainfall-runoff model both on the target catchment and on the donor catchments. We applied the regionalization scheme to produce a daily streamflows in 148 pseudo-ungauged catchments. In a second step, we recalibrate the GR4J rainfall-runoff model with changing rainfall inputs. The regionalized hydrographs produced before and after resampling are then compared to the observed streamflows. Results show that the sensitivity of the regionalization method to the knowledge of the areal rainfall is weak. The efficiency of the method is decreasing significantly when the areal rainfall is determined with less than two rain gauges.

Keywords : regionalization, dynamical sensitivity study, weather station networks, rainfall-runoff model, Rhine-Meuse basin

Introduction

Le présent article vise à évaluer l'impact de la qualité de l'information pluviométrique sur l'efficacité d'une méthode de régionalisation des écoulements de rivière par voisinage géographique. Cette méthode consiste à transposer les paramètres d'un modèle pluie-débit calé localement sur des bassins-donneurs (jaugés) vers un bassin-receveur (non jaugé). Une première application de la méthode à l'échelle du domaine Rhin-Meuse a été réalisée en utilisant les données quotidiennes de température de l'air et de précipitations du produit SAFRAN/France sur un échantillon de 149 bassins versants et pour une période de référence s'étendant de 1990 à 2009 (Plasse *et al.*, 2014). L'entrée en production de la méthode de régionalisation pour les besoins opérationnels du gestionnaire de l'eau (l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse) oblige à remplacer la base de données SAFRAN par des données météorologiques enregistrées par des stations météorologiques automatiques (typiquement les stations automatiques de type 0 à 2 de Météo-France). L'objectif de cet article est de montrer comment évolue la performance du modèle pluie-débit régionalisé en fonction de la densité du réseau de mesure météorologique.

1. Région d'étude

Le test de sensibilité a été appliqué à un territoire d'environ 38 000 km² situé dans le Nord-Est français (Figure 1). Il comprend des unités de relief variées comme les reliefs de côte de Lorraine, les massifs vosgien et ardennais ou encore la plaine d'Alsace. La disposition et les caractéristiques des massifs montagneux, au premier rang desquels figure le massif vosgien, induisent une dégradation brutale du climat semi-océanique du plateau lorrain relayé vers l'est par un climat tempéré encore semi-océanique, mais où la continentalité s'exprime avec plus de vigueur.

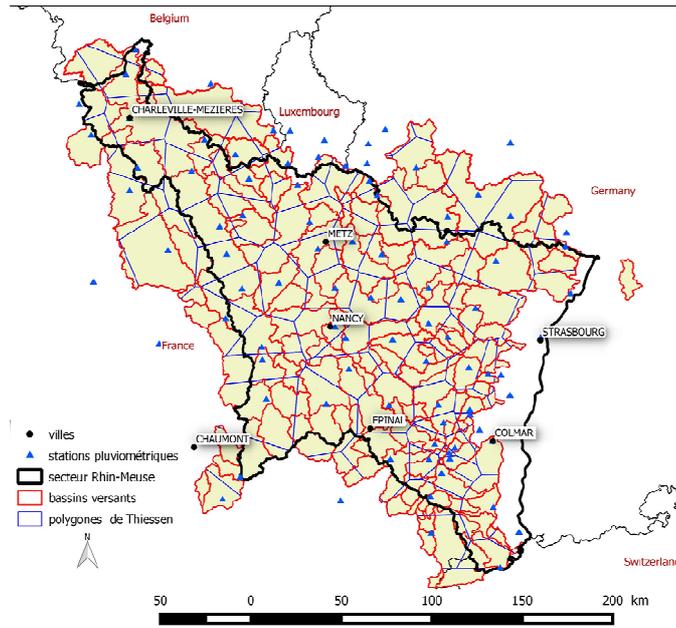


Figure 1. Réseau d'observation hydro-météorologique, polygonalement de Thiessen et limites de bassins versants

2. Données et méthodes

2.1. Séries hydro-météorologiques

Après un travail de collecte de données mené auprès des différents services météorologiques et hydrologiques desservant notre secteur d'étude (Nord-Est français et espaces limitrophes), le réseau de mesure hydro-météorologique potentiel pour mener à bien l'analyse de sensibilité sur les calculs hydrologiques est constitué de : 148 stations hydrométriques contrôlant des bassins à l'écoulement « naturel » et dont la superficie s'échelonne entre 8 et 10 800 km², 119 postes pluviométriques, 75 postes thermométriques utilisés pour le calcul de l'ETP (évapo-transpiration potentielle) de bassin. La période de référence retenue s'étend de 1990 à 2002 (12 années hydrologiques) car elle permet d'effectuer un test de la méthode de régionalisation avec un réseau de mesure météorologique constant. Sur cette période, l'effectif de postes « candidats » (i.e. sélectionné pour déterminer les entrées atmosphériques du modèle pluie-débit GR4J) est proche du potentiel opérationnel côté français (env. 75 stations de type automatique d'après la publinthèque de Météo-France consultée le 29/10/2014). Il est intéressant de constater qu'à l'instar des autres massifs montagneux français, dans les Vosges, au-delà d'une certaine altitude (environ 600 m), un désert météorologique apparaît. A titre d'exemple, dans la base de données que nous avons extraite de la publinthèque de Météo-France pour les besoins de cette étude, seul 1 poste pluviométrique fournissant une série de hauteurs de précipitations quotidiennes continue sur la période 1990-2002 est situé (en position sommitale) à plus de 800 m d'altitude, ce qui représente une densité d'environ 1 poste pluviométrique pour 2400 km² alors que l'OMM préconise une densité de 250 km² par poste pluviométrique (WMO, 2008). Toutes les données hydro-météorologiques ont été critiquées avant d'être bancarisées pour le test de sensibilité.

2.2. Protocole de test

Pour tester la sensibilité du modèle pluie-débit GR4J (efficacité et paramètres) aux données de précipitations, nous sommes partis du postulat suivant : la mesure de la pluie de bassin demeure matériellement impossible même pour des bassins versants très finement

instrumentés. Notre objectif n'est donc pas de chercher la méthode d'estimation optimale de la pluie de bassin mais plutôt de définir, à partir d'un réseau de mesure fixe, la stratégie d'échantillonnage spatial des précipitations qui répond au mieux au besoin de la méthode de régionalisation hydrologique. Plusieurs étapes de travail ont jalonné notre méthodologie :

✓ Etape 1 : *Constitution de groupements pluviométriques locaux (GPL) pour les 148 bassins de l'échantillon.* Dans l'optique de constituer des GPL pour chaque bassin de l'échantillon, trois règles ont été retenues : i) le périmètre d'influence d'un pluviomètre est obtenu par une polygonation de Thiessen qui situe les frontières du polygone sur les médiatrices séparant le pluviomètre de ses plus proches voisins. ; ii) le GPL est constitué de pluviomètres dont le périmètre d'influence intersecte les contours du bassin ; iii) les séries temporelles trop lacunaires sont éliminées. L'application de ces 3 critères de sélection au réseau pluviométrique disponible a conduit à évincer 26 pluviomètres de l'échantillon initial. L'échantillon final ne comporte plus que 93 pluviomètres.

✓ Etape 2 : *Génération aléatoire des GPL pour les 148 bassins de l'échantillon.* Soit un GPL à m pluviomètres. La fonction factorielle permettant de générer p combinaisons de k pluviomètres parmi m pluviomètres s'écrit :

$$\frac{m!}{k!(m-k)!} \quad (1)$$

A titre d'exemple, pour un bassin de 10000 km² un GPL constitué de 38 pluviomètres ($m = 38$) permet de produire pour $k = 1$, 38 combinaisons possibles soit une densité spatiale minimale de 1 pluviomètre/10000 km² ce qui constitue quasiment un désert pluviométrique. Pour $k = 2$, 703 combinaisons sont possibles, etc., et pour $k = 38$, 1 seule combinaison est possible soit une densité spatiale maximale de 1 pluviomètre/263 km². L'intérêt de cette méthode de sous-échantillonnage est de permettre d'agir sur deux leviers : la densité spatiale et la géométrie du réseau de mesure. Notons que quand k le permet, on se limite à 100 combinaisons ce qui, pour 38 pluviomètres, donne 3577 combinaisons au total.

✓ Etape 3 : *Calcul de la pluie de bassin et calage de GR4J.* La méthode de calcul de la pluie de bassin est volontairement simple et facile à mettre en œuvre. L'inverse de la distance euclidienne horizontale entre le centroïde de bassin et le pluviomètre est utilisée comme critère de pondération. La pluie de bassin est ensuite calculée par une moyenne spatiale des k pluviomètres. Pour chaque vecteur de pluie de bassin, le modèle GR4J est recalé (calage dynamique) selon le même protocole que celui établi dans le cadre de nos travaux antérieurs (Plasse *et al.*, 2014) mais cette fois sur la période 1993-1996 (5 ans).

✓ Etape 4 : *Evaluation de la qualité de l'information pluviométrique.* Pour évaluer quantitativement la qualité de l'information pluviométrique, deux indicateurs de la qualité de l'estimation de la pluie de bassin ont été définis. Il s'agit de l'indice de qualité GORE (Goodness of Rainfall Estimation) et BALANCE (Andréassian *et al.*, 2001). L'indice GORE est un indicateur de précision calculé pour les p combinaisons de k pluviomètres parmi m . Plus l'indice est proche de 1 et plus la pluie de bassin se rapproche de la pluie de référence. L'indice BALANCE est un indicateur de biais calculé pour les p combinaisons de k pluviomètres. Si l'indice est supérieur à 1 cela signifie que la pluie de bassin surestime la pluie de bassin référence. Si l'indice est inférieur à 1 cela signifie que la pluie de bassin sous-estime la pluie de bassin de référence. Pour chacun des 148 bassins de notre échantillon, la pluie de bassin de référence est calculée à partir du GPL incluant tous les pluviomètres « candidats », ce qui est équivalent à poser $k = k_{\max}$.

✓ Etape 5 : *Simulation du débit sur le bassin-receveur.* Le débit journalier est simulé sur le bassin-receveur avec GR4J sur la période de contrôle 1998-2002 (5 ans) par la méthode

du voisinage géographique (quatre voisins, moyenne des quatre hydrogrammes). Pour chaque bassin de l'échantillon et pour chaque valeur de k , le meilleur jeu de paramètres de chacun de ses quatre voisins est transféré à son exutoire. On donne ainsi la possibilité au modèle de donner le meilleur de lui-même – autrement dit de reproduire au mieux le fonctionnement hydrologique global du bassin-donneur avec l'information pluviométrique qu'on lui prescrit – lorsque ces paramètres sont transférés au point-cible. La pluie de bassin du bassin-receveur est calculée en sous-échantillonnant son GPL. L'ETP de bassin est calculée avec l'ensemble des postes thermométriques candidats (au nombre de 75) par la formule à base thermique de Oudin (Oudin *et al.*, 2005).

- ✓ Etape 6 : *Evaluation en validation croisée*. Lorsque l'hydrogramme est reconstitué au point-cible, les indices GORE et BALANCE sont comparés avec les valeurs du critère d'efficacité du modèle GR4J obtenues en contrôle. Le critère C2M s'écrit comme suit :

$$C2M_{\sqrt{Q}} = \frac{NS_{\sqrt{Q}}}{2 - NS_{\sqrt{Q}}} \quad (2)$$

où $NS_{\sqrt{Q}}$ représente la critère d'efficacité de Nash-Sutcliffe comparant l'erreur quadratique moyenne du modèle calculé sur la racine des débits et la variance de la racine carrée des débits observés, Q le débit moyen journalier. Plus le critère C2M est proche de 1 et meilleure est l'efficacité du modèle. Le protocole précité (étapes 1 à 6) a été répété 148 fois, chaque bassin jaugé étant tour à tour considéré comme non jaugé.

3. Résultats et discussion

3.1. Sensibilité du modèle GR4J en calage à la qualité de l'information pluviométrique

Le sous-échantillonnage aléatoire des groupements pluviométriques locaux (GPL) se traduit par une détérioration variable de la qualité de l'information pluviométrique (Figure 2). Pour certains bassins, cette détérioration peut être forte. Avec seulement deux pluviomètres ($k=2$) il est néanmoins possible d'approcher la connaissance optimale de la pluie de bassin pour la totalité des bassins de notre échantillon. La plupart des bassins sont bien modélisés par GR4J (une valeur de C2M de 0.65 est généralement considérée comme satisfaisante). Les plus faibles performances du modèle en calage sont atteintes lorsque le GPL ne comporte plus qu'un pluviomètre ($k=1$).

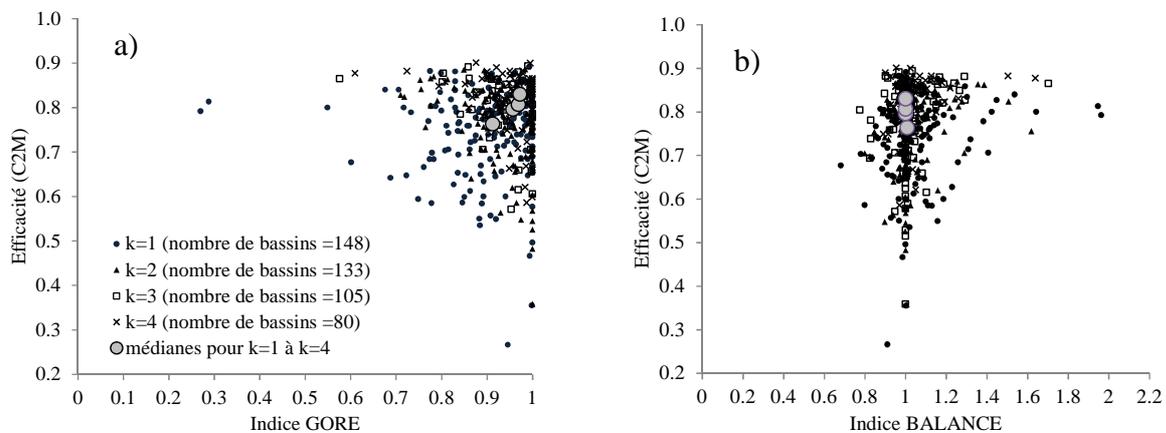


Figure 2. Evolution de l'efficacité du modèle pluie-débit GR4J en calage en fonction de la qualité de l'information pluviométrique (indices GORE (a) et BALANCE (b)). Le nombre de pluviomètres par bassin varie de 1 à 4 (valeurs de k). Période de calage 1993-1997, 148 bassins.

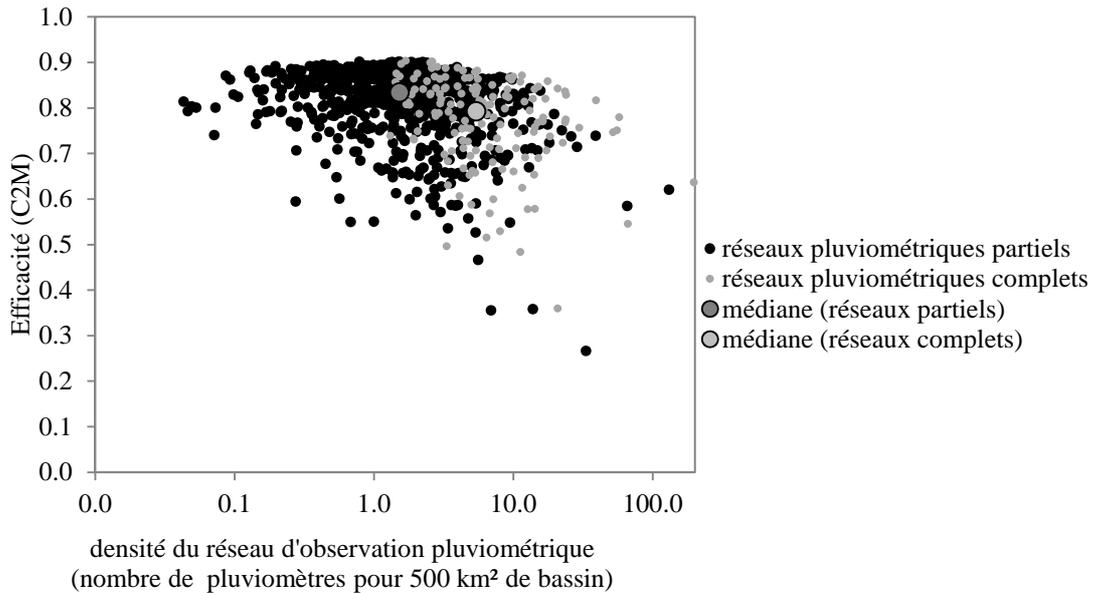


Figure 3. Evolution de l'efficacité du modèle pluie-débit au calage en fonction de la densité du réseau de mesure pluviométrique. Période de calage 1993-1997, 148 bassins.

La Figure 3 montre que le passage d'un réseau pluviométrique complet à un réseau pluviométrique partiel (donc plus ou moins « dégradé » par rapport au réseau complet) ne se traduit pas nécessairement par une perte d'efficacité. Ceci signifie à l'inverse, que le comportement du modèle hydrologique ne s'améliore pas significativement avec une plus grande concentration de pluviomètres.

3.2. Sensibilité de la méthode de régionalisation par voisinage géographique à la qualité de l'information pluviométrique

Les observations faites au calage à propos des indices GORE et BALANCE sont transposables pour le modèle régionalisé (Figures 4a) et 4b)). Lorsque la pluie de bassin prescrite au modèle pluie-débit est calculée à l'aide d'un seul pluviomètre, la baisse de performance de la méthode de régionalisation devient importante. Celle-ci s'avère peu sensible à la densité du réseau pluviométrique et tire peu partie de l'amplification du réseau de mesure (Figure 5).

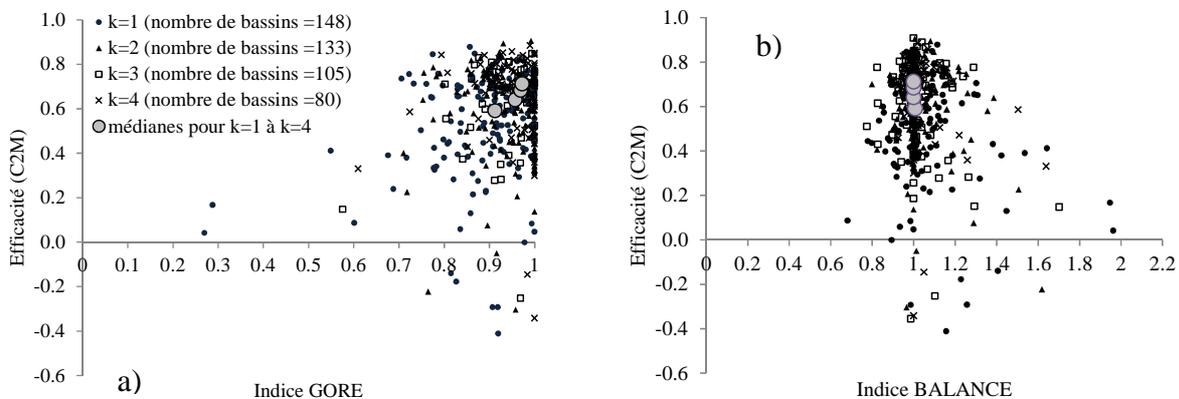


Figure 4. Evolution de l'efficacité du modèle pluie-débit régionalisé (voisinage géographique) en fonction de la qualité de l'information pluviométrique (indices GORE (a) et BALANCE (b)). La même valeur de k est prescrite au bassin-donneur et au bassin-receveur. Période de contrôle 1998-2002, 148 bassins.

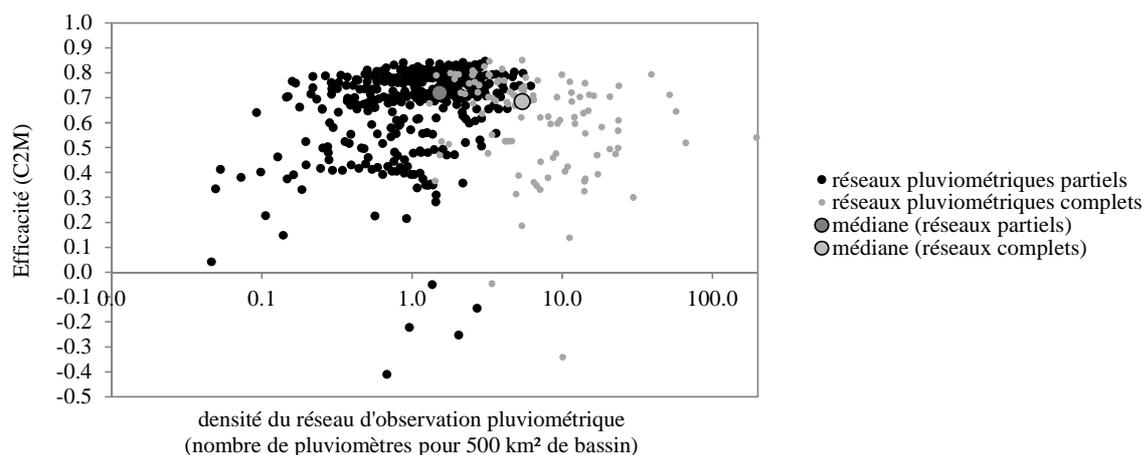


Figure 5. Evolution de l'efficacité du modèle pluie-débit régionalisé (voisinage géographique) en fonction de la densité du réseau de mesure pluviométrique. Période de contrôle 1998-2002, 148 bassins.

Conclusion

L'étude de sensibilité dynamique d'un modèle pluie-débit aux entrées de précipitation montre que celui-ci parvient, par compensation sur ces paramètres, à contrecarrer la baisse de qualité de l'information pluviométrique. Lorsque le modèle est régionalisé par voisinage géographique, l'analyse de sensibilité montre qu'il ne tire pas forcément avantage d'une amplification du réseau de mesure. La baisse de performance du modèle pluie-débit est principalement liée à l'opération de régionalisation. Un nombre minimum de pluviomètres (au moins deux par bassin) est préconisé pour garantir, en moyenne régionale, un niveau de performance satisfaisant lors de la reconstitution des hydrogrammes sur des bassins-versants non jaugés.

Remerciements

Météo-France (accès à la bibliothèque), le SCHAPI (Banque Hydro), l'AERM (financement de l'étude), le projet ECA&D (*We acknowledge the E-OBS dataset from the EU-FP6 project ENSEMBLES (<http://ensembles-eu.metoffice.com>) and the data providers in the ECA&D project (<http://www.ecad.eu>).* Haylock, M.R., N. Hofstra, A.M.G. Klein Tank, E.J. Klok, P.D. Jones, M. New. 2008: A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.*, 113, D20119, doi:10.1029/2008JD10201) pour l'accès aux données météorologiques belges et allemandes, le service météorologique de l'aéroport de Luxembourg et l'Administration des Services Techniques de l'Agriculture pour les données pluviométriques luxembourgeoises, le German Federal Waterways and Shipping Administration ainsi que le German Federal Institute of Hydrology (BfG) (accès aux données de débits allemandes), le Deutscher Wetterdienst (DWD), le Service public de Wallonie, Direction générale opérationnelle Mobilité et Voies hydrauliques, Direction de la Gestion hydrologique intégrée, Service d'Etudes Hydrologiques (SETHY) pour les données débitométriques belges, mises à disposition gratuitement.

Références bibliographiques

- Andréassian V., Perrin P., Michel C., Usart-Sanchez I., Lavabre J., 2001 : Impact of Imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models. *Journal of Hydrology*, **250**, 206-223.
- Oudin L., Hervieu F., Michel C., Perrin C., Andréassian V., Anctil F., Loumagne C., 2005 : Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, **303**, 290-306.
- Plasse J., Drogue G., François D., Battaglia P., Conan C., 2014 : Apport des jaugeages ponctuels à la reconstitution des chroniques de débits par simulation pluie-débit : l'exemple du bassin Rhin-Meuse. *La Houille Blanche, Revue Internationale de l'Eau*, **1**, 45-52, DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/lhb/2014007>.
- World Meteorological Organization, 2008 : *Guide to Hydrological Practices*, Volume I. Hydrology – From Measurement to. Hydrological Information. WMO-No. **168**, sixth edition, 296 p.