

Analyse de la sensibilité des calculs hydrologiques à la densité spatiale des réseaux hydrométriques

Laure LEBECHEREL¹, Vazken ANDRÉASSIAN¹, Charles PERRIN¹ & Pascal MAUGIS²

¹ Irstea, Unité de recherche Hydrosystèmes et Bioprocédés (HBAN) - 1 rue Pierre-Gilles de Gennes CS10030 92761 Antony cedex, France – email : laure.lebecherel@irstea.fr; vazken.andreassian@irstea.fr; charles.perrin@irstea.fr

² Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), Unité Mixte de Recherche CEA-CNRS-UVSQ (UMR 8212) – Centre de Saclay, Orme des Merisiers 91 191 Gif-sur-Yvette Cedex, France – email : pascal.maugis@lsce.ipsl.fr

RÉSUMÉ. – Cette étude évalue l'impact de la densité spatiale du réseau hydrométrique sur certains calculs hydrologiques, en situation de bassin versant non jaugé. Nous abordons la simulation de chroniques de débit journalier, l'estimation du module, de débits de crues décennale et centennale et de certaines caractéristiques de débit d'étiage. Dans ce contexte, le modèle conceptuel pluie-débit GR4J a été utilisé, ainsi que la méthode de régionalisation basée sur la proximité spatiale des bassins versants. La présente étude consiste ainsi à évaluer l'influence de la distance à laquelle se trouvent les bassins versants donneurs utilisés pour la régionalisation, sur l'efficacité du calcul hydrologique envisagé. Cette évaluation montre que pour tous les calculs de débit envisagés ici, l'efficacité du processus de régionalisation diminue lorsque le réseau de bassins voisins devient moins dense (c'est-à-dire lorsque l'on « supprime » les bassins voisins les plus proches). Cette chute d'efficacité impacte pareillement les différentes variables hydrologiques considérées.

Mots-clés : densité spatiale, réseau hydrométrique, bassin versant non jaugé

Sensitivity of hydrological computations to the spatial density of runoff networks

ABSTRACT. – This study evaluates the impact of the spatial density of the flow gauging network on hydrological computations in an ungauged catchment context. The considered computations are simulation of daily streamflow, estimation of long-term average streamflow and extreme streamflows (10-yr and 100-yr floods and some characteristics on low flows). In this context, we used the lumped rainfall-runoff model GR4J. The regionalization applied here, is based on the spatial proximity of catchments. The aim of the study is to evaluate the impact of the distance at which the first donor stations are located, on the efficiency of the hydrological computations. This evaluation shows that for all the computations of streamflow considered here, the efficiency of the regionalization process decreases when the flow gauging network density is reduced (i.e. when we “remove” the closest catchments). Results also show that this drop in efficiency similarly impacts all the hydrological variables analyzed here.

Key-words: spatial density, hydrometrical network, ungauged catchment

I. INTRODUCTION

I.1. Contexte

Les données de débit sont essentielles pour mener à bien différents calculs hydrologiques relatifs à la simulation, la prévision, la prédétermination (etc.) de diverses variables. Elles permettent d'obtenir des informations sur les régimes et les extrêmes, les tendances passées, mais également sur le comportement hydrologique du bassin versant. Dans ce contexte, la représentativité des informations de débit (en qualité et en quantité) est capitale afin de limiter les incertitudes des calculs hydrologiques, liées à l'échantillonnage de cette variable dans le temps et dans l'espace. La conception des réseaux de mesure est, de ce fait, essentielle.

En France, la question de la conception optimale des réseaux hydrométriques n'est pas nouvelle. Dans les années 1970, le Ministère de l'Agriculture a lancé des études pour concevoir de manière rationnelle un réseau hydrométrique, fournissant un maximum d'informations de qualité au moindre coût [Dubreuil, 1968]. Dans le cadre des attributions du Ministère de l'Agriculture en matière d'inventaire des res-

sources en eau superficielle, il s'agissait d'étendre le réseau existant harmonieusement et à l'échelle nationale, pour passer de 500 à 1000 stations. D'autre part, dès les années 1960, l'Organisation Mondiale de la Météorologie recommandait des densités minimales pour les réseaux hydrométriques en admettant qu'un réseau optimal devait comprendre autant de stations sur grands et petits bassins [WMO, 1965].

Ces réseaux peuvent cependant paraître onéreux pour leurs gestionnaires, d'où la réflexion sur leur « rationalisation ». Au cours des dernières décennies, pour des raisons principalement économiques, certains pays ont eu à réfléchir à la façon dont ils pouvaient réduire la densité de ces réseaux (Royaume-Uni dans les années 1970, Canada actuellement...). Toutefois, cette « rationalisation », qui se traduit souvent par une baisse de densité du réseau, peut dégrader notre connaissance de l'hydrologie, et notamment augmenter les incertitudes des calculs hydrologiques. Quantifier cette augmentation présente un certain nombre de difficultés, car elle dépend dans une certaine mesure de l'objectif hydrologique, des outils utilisés et des caractéristiques des bassins versants étudiés (taille du bassin, homogénéité climatique et physique du bassin).

I.2. Revue de la littérature

Des études portant sur la sensibilité des calculs hydrologiques à la densité spatiale du réseau hydrométrique ont été menées en situation de bassin versant non jaugé, c'est-à-dire quand le bassin versant concerné ne possède pas de mesures de débit à son exutoire. Dans ce cas, il est nécessaire de recourir à différentes méthodes d'extrapolation (régression ou régionalisation à partir des paramètres des bassins voisins, etc.) afin de pouvoir proposer des valeurs de paramètres de modèle hydrologique sur le bassin non jaugé. Tenir compte de plusieurs bassins voisins permet de réduire les erreurs d'estimation de débit du bassin non jaugé, en lissant la réponse avec d'autres sources [Oudin *et al.*, 2008]. Toutefois, considérer des bassins trop lointains ou au comportement hydrologique trop contrasté peut également amener des erreurs.

Récemment, Boldetti *et al.* [2010] ont proposé une nouvelle méthodologie pour l'identification des bassins jaugés qui ne devraient pas être pris en compte en tant que donneurs dans le contexte d'un exercice de régionalisation. Lors de cette étude, ils ont en particulier testé l'impact de la densité des stations donneuses. Les résultats ont montré qu'avec un réseau moins dense, les améliorations suite au rejet de certains donneurs jugés indésirables, étaient moins importantes. Le pourcentage optimal de donneurs était réduit également et les performances chutaient plus rapidement quand trop de bassins étaient écartés.

Au Canada, un important plan de réduction des mesures hydrologiques a commencé au milieu des années 1990, en raison de pressions budgétaires au niveau fédéral. Dans ce contexte, l'étude de Spence *et al.* [2007] a eu pour objectif de quantifier l'effet de l'arrêt des mesures hydrométriques sur les capacités de prévision des débits, effectuée par méthode statistique, dans la région du Nord du Canada. La méthode utilisée trouve des voisins hydrologiques ou des groupes de bassins homogènes pour corréler les mesures de débit avec les caractéristiques physiographiques et climatiques de chaque bassin. Les résultats indiquent que lorsque 12 stations sur 34 sont fermées sur un domaine avoisinant les 1 500 000 km², les erreurs d'extrapolation augmentent de 16% pour tous les quantiles de débit.

Andréassian *et al.* [2012] se sont intéressés à la reconstitution de débits à l'aide d'une approche débit-débit, employant des voisins multiples. Ils ont montré que l'efficacité du modèle débit-débit diminue quand le réseau (composé de 20 à 200 stations / 100 000 km²) devient moins dense, mais au début avec une faible diminution (il y a peu de différences entre le réseau entier et celui réduit de 20%).

Ainsi, la densité spatiale des stations hydrométriques semble avoir un impact sur les performances des modèles hydrologiques dans le cadre de la régionalisation des paramètres nécessaires à l'estimation des débits pour les bassins non jaugés. Il semblerait alors essentiel de pouvoir quantifier au mieux les effets d'une augmentation ou une diminution du nombre de stations hydrométriques dans ce cas. Il est important de rappeler toutefois, que les résultats dépendent fortement de l'objectif hydrologique fixé, des bassins étudiés et probablement également de la méthode de simulation (ici par modèle conceptuel intégrant des données exogènes de pluie).

I.3. Objectifs

Cette étude a pour objectif d'évaluer l'impact de la densité spatiale du réseau hydrométrique sur les calculs hydrologiques.

Nous nous intéressons en particulier à la simulation de chroniques de débit journalier, à l'estimation du module, des débits de crues décennale et centennale et à certaines caractéristiques de débit d'étiage. Nous présentons d'abord en section II les 609 bassins versants sur lesquels notre analyse est basée, puis le principe de régionalisation utilisé et les différents calculs envisagés. La section III présente ensuite les résultats.

II. MÉTHODOLOGIE

II.1. Base de données

Dans cette étude, la base de données se compose de 609 bassins versants, sans impact anthropique majeur identifié sur l'hydrologie et situés en France métropolitaine (Figure 1). Ces bassins présentent des conditions climatiques variées (continentale, océanique, méditerranéenne).

Le Tableau 1 présente les caractéristiques principales de l'échantillon de bassins versants, en termes de surface de bassin, de débit (Q), pluie (P) et évapotranspiration potentielle (ETP) moyens annuels.

Les données utilisées au cours de cette étude sont des données journalières de pluie et de débit aux stations de jaugeage. Les données de pluie moyenne de bassin ont été calculées à partir des données SAFRAN de Météo France. Les données de débit sont issues de la Banque Hydro. Les bassins versants sélectionnés ont tous au minimum des données de pluie et de débit comprises entre 1997 et 2006 (période utilisée pour le calage des paramètres du modèle hydrologique pluie-débit GR4J) et possèdent au moins 30 ans de données.

II.2. Principe d'une régionalisation basée sur la proximité spatiale

Les modèles hydrologiques pluie-débit nécessitent des données observées de débit, de pluie et d'évapotranspiration potentielle pour pouvoir caler leurs paramètres. Cependant, tous les bassins ne possèdent pas de station de mesure de

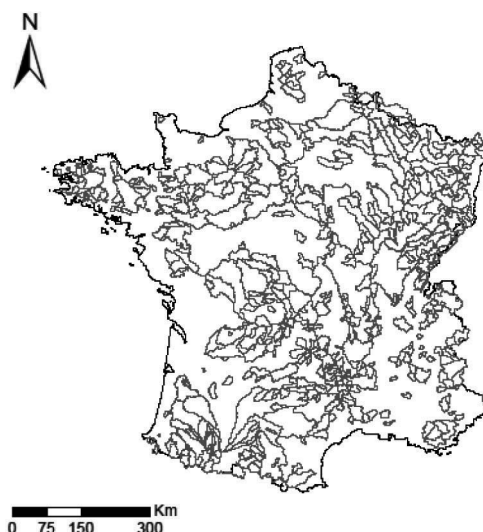


Figure 1 : Carte des 609 bassins versants français utilisés dans cette étude.

Tableau 1 : Principales caractéristiques de l'échantillon de bassins versants

Quantiles	0.00	0.25	0.5	0.75	1.00
Surface (km ²)	5	109	270	833	111975
Précipitation moyenne annuelle, P (mm/an)	620	863	1003	1209	2112
Débit moyen annuel, Q (mm/an)	67	272	411	643	2296
ETP moyenne annuelle (mm/an)	289	616	655	687	875

débit et les hydrologues se retrouvent alors dans l'impossibilité de caler leurs modèles hydrologiques à partir de données de débit observées sur ce bassin. Depuis les années 1970, ils se sont ainsi penchés sur la façon dont ils pouvaient estimer les paramètres de leurs modèles sans avoir besoin de les caler (James [1972]; Magette *et al.* [1976]). Le terme de régionalisation est apparu dans les études de classification des bassins (recherche de régions « hydrologiquement homogènes ») [Gottschalk *et al.*, 1979], puis a été étendu au contexte de modélisation pluie-débit pour le transfert des paramètres de bassins voisins jaugés vers le bassin non jaugé [Oudin *et al.*, 2008].

La méthode choisie pour cette étude est la régionalisation des chroniques basée sur la proximité spatiale des bassins versants. Oudin *et al.* [2008] ont montré qu'en France cette méthode, utilisée avec des modèles pluie-débit, fournissait la meilleure solution de régionalisation (en comparaison avec la régionalisation utilisant la régression et celle basée sur des similarités physiques). Cette conclusion est à relier avec la densité importante de stations disponible en métropole.

La régionalisation basée sur la proximité spatiale consiste à utiliser les paramètres calés sur les bassins voisins pour calculer le débit sur le bassin non jaugé. Pour la suite du rapport, nous qualifierons de « donneurs » les bassins jaugés voisins du bassin non jaugé (qui devient donc « receveur ») et qui lui transmettent leurs paramètres.

II.3. Différents tests possibles

L'impact de la disponibilité spatiale des postes hydrométriques peut être évalué de deux façons :

- en faisant varier le nombre total de bassins versants voisins considérés pour le transfert des paramètres du modèle hydrologique ;
- en testant différentes configurations de réseau, pour notamment évaluer l'impact de la distance à laquelle se situent les bassins voisins par rapport au bassin cible non jaugé (création d'un « désert hydrométrique » autour du bassin receveur).

Des tests préliminaires (non présentés ici) ont montré que considérer les 10 premiers voisins était suffisant pour obtenir de bonnes performances. Dans cet article, nous nous concentrerons sur les résultats du test du désert hydrométrique. Cette méthode développée par Boldetti [2012], permet d'évaluer la robustesse de la régionalisation, à mesure que l'on réduit le nombre de stations dans le réseau. En effet, cela consiste à utiliser progressivement des bassins donneurs qui sont de plus en plus éloignés du bassin non jaugé, en installant une limite de distance en deçà de laquelle les voisins ne sont pas pris en compte (on fait « disparaître » les bassins voisins les plus proches). Les distances limites testées sont : 0 (pas de limite de distance), 50, 100, 150, ..., 500 km.

II.4. Le modèle GR4J et son utilisation en régionalisation

Afin de simuler le débit journalier, le modèle hydrologique GR4J développé au sein du Cemagref/Irstea [Perrin *et al.*, 2003] a été utilisé. Il s'agit d'un modèle conceptuel pluie-débit à quatre paramètres. Il se compose de deux réservoirs : réservoir de production (en relation directe avec les données de pluie (P) et d'évapotranspiration potentielle (ETP)) et réservoir de routage associé à un hydrogramme unitaire (qui assure le transfert de l'eau dans le temps). Les données d'entrée du modèle sont la pluie (P) et l'évapotranspiration potentielle (ETP).

Pour un bassin versant non jaugé, l'utilisation du modèle GR4J a consisté à caler les paramètres du modèle pour les n (ici $n = 10$) bassins versants voisins sur une période de 10 ans (1997-2006). Puis, n simulations du débit journalier du bassin non jaugé ont été effectuées (avec chacun des n jeux de paramètres), en utilisant les données de pluie et d'ETP du bassin non jaugé en entrée du modèle. On a ainsi obtenu n chroniques de débit journalier pour le bassin cible. La chronique finale retenue résulte d'une pondération par l'inverse de la distance au carré entre bassins voisins et bassin non jaugé, comme présenté dans l'équation (1). Oudin *et al.* [2008] et McIntyre *et al.* [2005] ont montré que cette méthode était plus cohérente que celle consistant à moyenner les paramètres des bassins voisins, puisqu'elle utilisait des jeux de paramètres non modifiés. Ceci permettait ainsi d'utiliser une information totale contenue dans les paramètres des voisins calés localement.

$$Q_{\text{bas sin non jaugé}} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(Q_{\theta_i} \times \frac{1}{d_i^2} \right)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2}} \quad (1)$$

avec Q_{θ_i} : débit du bassin non jaugé obtenu avec le jeu de paramètre θ du bassin voisin i et d_i : distance entre le bassin non jaugé et le bassin voisin i .

Des précédents travaux réalisés à Irstea [Khalifa, 2011] ont montré qu'utiliser une distance combinant distance séparant les exutoires du bassin non jaugé et du bassin voisin i (d_{exutoire}) et distance séparant les centroïdes du bassin non jaugé et du bassin voisin i ($d_{\text{centroïde}}$), est plus efficace pour transférer l'information entre bassins de tailles différentes. La distance considérée dans (1) est alors la distance hydrologique définie comme :

$$d = 0.2 \times d_{\text{exutoire}} + 0.8 \times d_{\text{centroïde}} \quad (2)$$

Cette distance hydrologique est également celle considérée pour construire le désert hydrométrique.

II.5. Les calculs hydrologiques considérés

Dans cette étude, quatre estimations de débit sont envisagées :

II.5.1. Simulation d'une chronique de débit journalier avec le modèle GR4J

Pour la simulation de la chronique de débit journalier sur le bassin non jaugé, le calage des paramètres des bassins voisins est dans un premier temps effectué sur la période 1997-2006, puis utilisé sur cette même période pour calculer une série moyenne de débit sur le bassin versant non jaugé à l'aide des données de pluie et d'ETP observées sur ce bassin (voir la méthode de régionalisation en II.4).

II.5.2. Calcul du module

Pour le calcul du débit moyen pluri-annuel, appelé également module, de longues chroniques de débit sont nécessaires (au moins 18 années d'après Sauquet et Catalogne [2010]). Ainsi, les paramètres des bassins voisins calés sur la période 1997-2006, ont été utilisés pour simuler une série moyenne de débit sur le bassin versant non jaugé sur la période 1977-2006 (voir la méthode de régionalisation en II.4). Le débit moyen à long terme est alors obtenu en moyennant les débits journaliers de cette chronique moyenne simulée sur 30 ans.

II.5.3. Calcul des débits de crue décennale et de crue centennale

La détermination des quantiles extrêmes (crue et étiage) nécessite également des chroniques de débit de longue durée (au moins 26 années d'après Catalogne et Sauquet [2011]). La chronique obtenue lors du calcul du module a été aussi utilisée pour les calculs de débits de crues décennale et centennale.

Afin de calculer les valeurs de débits de crue décennale et de crue centennale, la loi de Gumbel [Lang, 2007] a été utilisée. Les paramètres de cette loi ont été estimés avec la méthode des moments.

Ainsi, après avoir échantillonné les débits maximaux journaliers de chaque année, nous utilisons la loi de Gumbel pour déterminer les quantiles 0.9 (crue décennale) et 0.99 (crue centennale).

II.5.4. Calcul des caractéristiques d'étiage

Dans cette étude, trois caractéristiques d'étiage ont été envisagées : le QMNA5 (débit minimal mensuel de période de retour 5 ans) et les quantiles 0.05 et 0.10 de la distribution des débits journaliers.

La méthode de référence utilisée pour estimer la valeur du QMNA5 est un ajustement statistique log-normal sur les valeurs minimales annuelles.

II.6. Calage des paramètres

Selon l'objectif hydrologique, différentes fonctions objectif ont été utilisées pour le calage des paramètres du modèle GR4J :

- Débits journaliers et module : critère de Nash et Sutcliffe [1970] calculé sur la racine carrée des débits ;
- Débits d'étiage (QMNA5, quantiles de débit 0.05 et 0.10) : critère de Nash et Sutcliffe [1970] calculé sur le logarithme des débits ;
- Débits de crues décennale et centennale : critère KGE développé par Gupta *et al.* [2009]

II.7. Evaluation du modèle

Pour l'évaluation des performances du modèle GR4J pour la simulation de la chronique de débit journalier, le critère de Nash et Sutcliffe [1970] sur la racine des débits a été utilisé. Afin d'évaluer les performances des autres estimations de débit (moyen à long terme, de crue décennale ou centennale et d'étiage), l'erreur absolue entre débit calculé et débit observé (3) a été calculée pour chaque bassin :

$$\text{Erreur absolue} = |Q_{cal} - Q_{obs}|, \quad (3)$$

avec Q en mm/an ou mm/jour selon le calcul envisagé (voir la partie résultats en III.2).

Pour les résultats, nous présentons la distribution des valeurs du critère de Nash et Sutcliffe (NSE) pour la simulation de la chronique journalière ainsi que celles de l'erreur absolue pour les autres calculs de débit pour tous les bassins étudiés.

III. RÉSULTATS

III.1. Evaluation préalable suivant les gammes de débit

La Figure 2 présente les résultats par gamme de débits (quantiles de non dépassement de débits journaliers de 5% (basses eaux) à 95% (hautes eaux)). On observe d'une part que l'amplitude des erreurs relatives augmente lorsque l'on passe d'un modèle calé (Figure 2-a) à un modèle régionalisé (Figure 2-b), ce qui est attendu. D'autre part, aussi bien pour le cas régionalisé que pour le cas jaugé, on observe que les débits d'étiage (quantiles de débit 5% à 15%) et les débits de hautes eaux (quantiles de débit 70% à 95%) sont sous-estimés. Entre ces deux extrêmes, les débits moyens sont quant à eux un peu surestimés.

III.2. Evaluation de la robustesse de la régionalisation

La Figure 3 montre dans un premier temps, que pour tous les calculs de débits envisagés, l'utilisation de la régionalisation pour le calcul des débits du bassin non jaugé apporte de moins bons résultats que dans le cas de référence. Ce résultat était attendu puisque le cas de référence correspond au cas « idéal » (lorsque les données de débit sur le bassin cible sont disponibles pour caler les paramètres du modèle). On observe également que pour chacun des débits cibles, les performances en régionalisation se dégradent lorsque la distance au plus proche voisin augmente mais atteint un palier à partir d'une distance de 150 km. Ainsi, lorsque les bassins voisins sont éloignés de plus de 150 km, le rôle de la proximité géographique des bassins voisins semble s'affaiblir.

D'autre part, cette baisse d'efficacité, non négligeable, correspond en moyenne à une dégradation de 20 à 30 % des calculs de débits lorsque la distance du plus proche voisin augmente de 0 à 100 km. On remarque toutefois que cette chute de performance est modérée et très inférieure aux erreurs dues à la méthode de régionalisation elle-même (lorsqu'elle tire parti des données locales ou de toutes les données voisines disponibles). Elle est de plus très similaire pour toutes les variables de débit considérées.

IV. CONCLUSION

Le but de cette étude était d'évaluer l'impact de la densité spatiale du réseau hydrométrique sur des calculs de débit

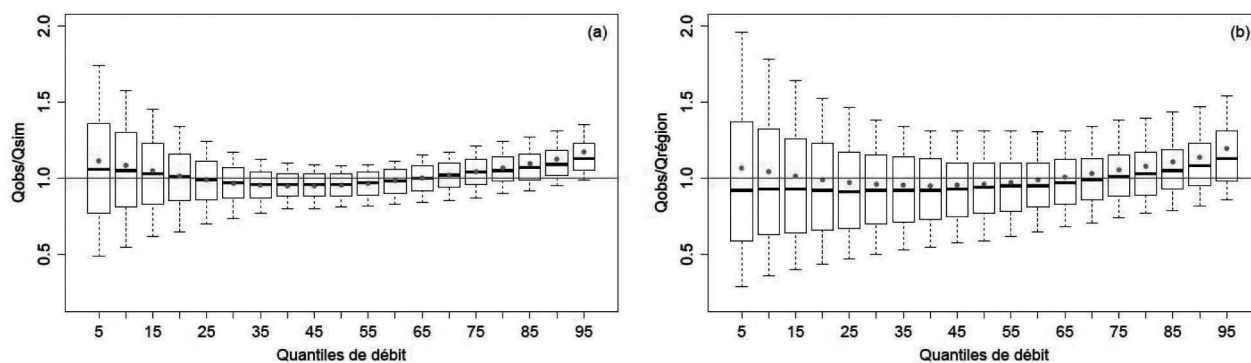


Figure 2 : Performance des reconstitutions de quantiles sélectionnés : a- en utilisant un calage de GR4J sur les données observées et b- en utilisant des chroniques régionalisées avec GR4J. Note : calage réalisé en NSE sur la racine carrée des débits.

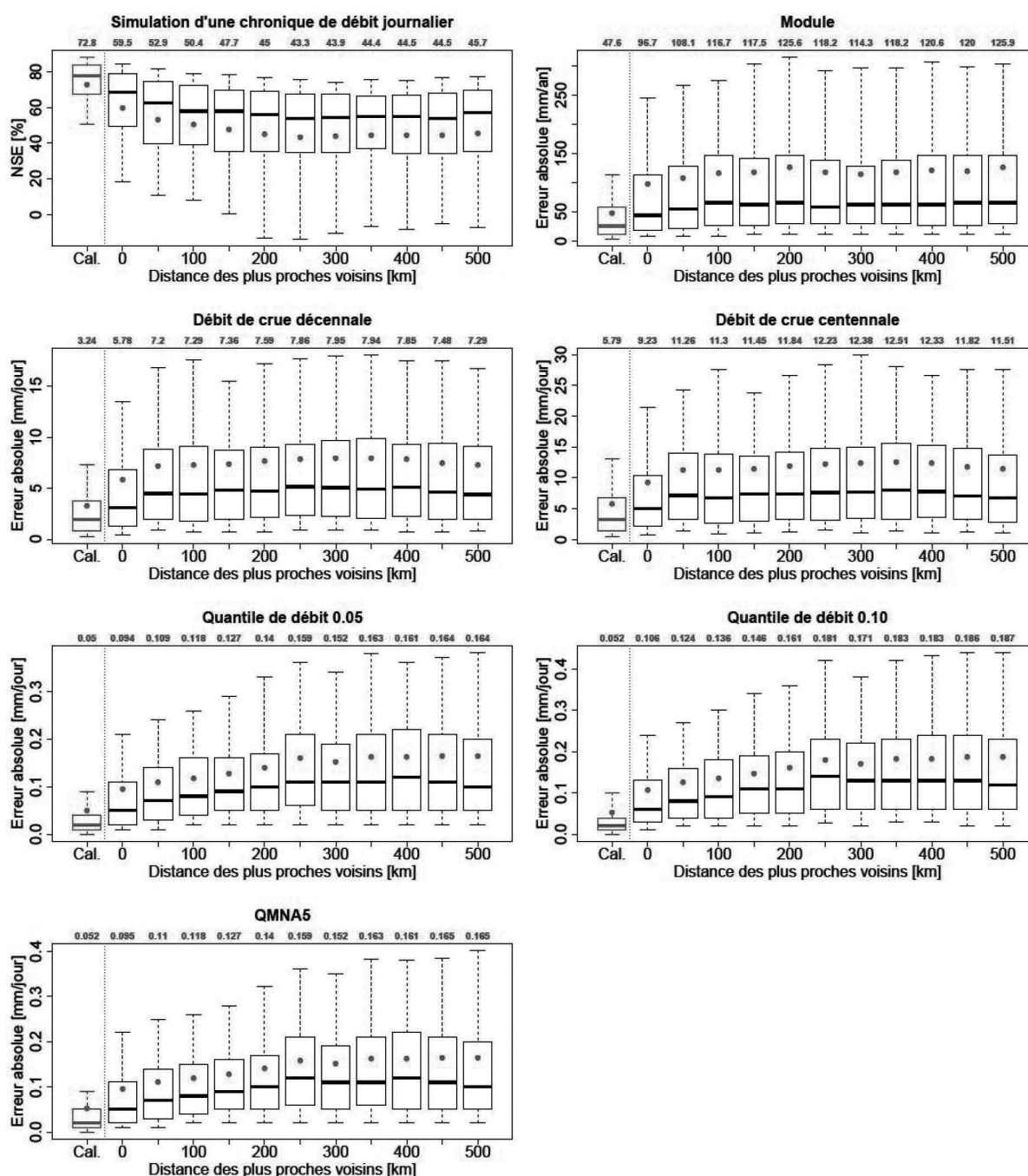


Figure 3 : Influence de la distance à laquelle se situent les bassins voisins sur l'efficacité de la régionalisation avec le modèle GR4J pour les différents calculs envisagés. Le boxplot « Cal. » ou « Ref. » présente le cas où les paramètres du modèle GR4J et les débits simulés ont été obtenus par calage à l'aide des données de débit observées sur le bassin cible. La distance 0 km correspond au cas où aucune limite de distance des plus proches voisins n'est appliquée.

réalisés pour des bassins non jaugés. Nous avons abordé la simulation de chroniques de débit journalier, l'estimation du module, des débits de crues décennale et centennale et de trois caractéristiques de débit d'étiage dont le QMNA5.

Nos résultats montrent que pour tous ces calculs, la performance du processus de régionalisation diminue de façon très similaire lorsque le réseau de bassins voisins devient moins dense (lorsque l'on supprime les bassins voisins les plus proches). Toutefois, cette chute d'efficacité liée à l'augmentation de la distance des plus proches voisins est moindre en comparaison à celle attribuée à la méthode de régionalisation elle-même.

En conclusion, la densité spatiale du réseau hydrométrique a un impact sur les performances des calculs hydrologiques en situation non jaugée. En effet, l'information des bassins voisins est essentielle au bassin non jaugé pour la simulation du débit en mode non jaugé.

V. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Météo-France et le SCHAPI pour la mise à disposition des données pluviométriques et hydrométriques respectivement. L'ONEMA est également remercié pour le soutien financier des travaux de thèse du premier auteur.

VI. REFERENCES

- ANDREASSIAN V., LERAT J., LE MOINE N., PERRIN C. (2012) — Neighbors: nature's own hydrological models. *Journal of Hydrology*. **414/415** : 49-58
- BOLDETTI G. (2012) — *Estimation of the parameters of hydrological models on ungauged basins: a comparison of direct and indirect approaches*. PhD thesis, AgroParisTech-Irstea. 207 pp.
- BOLDETTI G., RIFFARD M., ANDRÉASSIAN V., OUDIN L. (2010) — Data-set cleansing practices and hydrological regionalization: is there any valuable information among outliers? *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologique*. **55(6)** : 941-951
- CATALOGNE C., SAUQUET E. (2011) — *Interpolation des débits de référence d'étiage, Rapport d'étude Cemagref & ONEMA*. 35 pp.
- DUBREUIL P. (1968) — *Etude de l'extension rationnelle du réseau hydrométrique du ministère de l'agriculture, Ministère de l'agriculture, Direction de l'équipement et de l'hydraulique; Office de la recherche scientifique et technique Outre-Mer, Service hydrologique*. 96 pp.
- GOTTSCHALK L., JENSEN J. L., LUNDQUIST D., SOLANTIE R., TOLLAN A. (1979) — Hydrologic regions in the Nordic countries. *Nordic Hydrology*. **10(5)** : 273-286
- GUPTA H. V., KLING H., YILMAZ K. K., MARTINEZ G. F. (2009) — Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*. **377(1-2)** : 80-91
- JAMES L. D. (1972) — Hydrologic modeling, parameter estimation, and watershed characteristics. *Journal of Hydrology*. **17(4)** : 283-307
- KHALIFA A. (2011) — *Tentative d'amélioration des techniques de régionalisation des modèles hydrologiques pluie-débit. Rapport de Master 2 UPMC, Cemagref, Antony*
- LANG M., LAVABRE J. (2007) — *Estimation de la crue centennale pour les plans de prévention des risques d'inondations. Quae ed.* 232 pp.
- MAGETTE W. L., SHANHOLTZ V. O., CARR J. C. (1976) — Estimating selected parameters for Kentucky watershed model from watershed characteristics. *Water Resources Research*. **12(3)** : 472-476
- MCINTYRE N., LEE H., WHEATER H., YOUNG A., WAGENER T. (2005) — Ensemble predictions of runoff in ungauged catchments, doi12410.11029/12005WR004289. *Water Resour. Res.* **41**: 4 : W1243
- NASH J. E., SUTCLIFFE J. V. (1970) — River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. **10(3)** : 282-290
- OUDIN L., ANDREASSIAN V., PERRIN C., MICHEL C., LE MOINE N. (2008) — Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: a comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments., doi03410.01029/02007WR006240. *Water Resour. Res.* **44** : W03413
- PERRIN C., MICHEL C., ANDREASSIAN V. (2003) — Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*. **279(1-4)** : 275-289
- SAUQUET E., CATALOGNE C. (2010) — *Interpolation des modules : quelles évolutions depuis la note technique de 1987 ?*, Note de travail interne Cemagref. 29 pp
- SPENCE C., SASO P., RAUSCH J. (2007) — Quantifying the impact of hydrometric network reductions on regional streamflow prediction in Northern Canada. *Canadian Water Resources Journal*. **32(1)** : 1-20
- WMO (1965) — Guide to Hydrometeorological practices. 1ère ed. *WMO*. **168** : 115 pp.