

Université Pierre et Marie Curie

Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie

Parcours Hydrologie-Hydrogéologie

airGR un package de modélisation hydrologique à améliorer ?

Évaluation sur un large échantillon de bassins versants

Sofia Victoria Mata Espinoza

Directeur(s) de recherche : Olivier Delaigue et Guillaume Thirel



IRSTEA

U. R. Hydrosystème et Bioprocédés

1, rue Pierre-Gilles de Gennes

CS 10030

92761 Antony Cedex - France

Juin 2017



Abstract

Hydrological models, which can be used as tools to better understand the behavior of different components of the hydrological cycle, are also used to assess the impact of different future scenarios that simulate climate, demographic and land use in water cycle, giving as result information for the sustainable management of water resources, or for example the anticipation of risks.

However, the ability of most hydrological models to reproduce reality is not perfect. A possible way to improve flow simulation is to use existing model structures as a starting point and then to modify them gradually.

In this framework, the aim of this course is to improve the airGR package working with the GR4J model on a large sample of watersheds with various hydro-climatic conditions: 605 basins in France, 209 in Australia and 416 in the United States. airGR package is an R package developed by the Watershed Hydrology team (HBAN) of IRSTEA Antony which includes several rainfall-flow models called GR hydrological models.

We made comparison between the structures to 1 and 2 unitarian hydrograms of the hydrological model GR4J, which was used only and coupled with the model degree-day CemaNeige which takes into account the contribution of snow for a better simulation of the debits(flows).

As a result, we obtained a small difference between the mean of criteria for all the basins by both models. Compared to objective functions, we also have similar values. Following the analysis of each basin, we observed better values of criteria for GR4J1UH on the basins of the United States. However, some ponds have a lower criterion with GR41UH. This is related to the surface and geological characteristics of basin. Basins with a smaller surface area have lower criteria with model at a unit hydrograph, also for basins with poorly permeable aquifer systems. Thanks to the analysis of percentiles of absolute error, we found for all the countries, similar values for both models on the low flows, average flows, and high flows. We also analyzed the difference between the correlation coefficients of each model and found for all countries similar values for both models. Compared to objective functions, we note a better-quality score with KGE (closer to 1). We are also interested in the values of the parameters before and after modification: they are similar for parameters X_1 , X_2 and X_3 and vary for X_4 (with or without CemaNeige); for X_4 they differ more. These results are consistent with the modification to model structure (X_4 being the base time of the unit hydrograph). In order to detect the influence of models on performance for high flows, medium flows and low flows, we compared performances for high flows, average flows and low flows, initially calibrated on high flows, average flows, and low flows, using the NSE and KGE criteria. We have obtained similar values for all countries, in all cases.

Remerciements

Ce stage a été réalisé grâce au soutien des nombreuses personnes que je souhaite remercier.

Je remercie tout d'abord mes deux encadrants Olivier Delaigue et Guillaume Thirel, pour m'avoir confié ce travail, leurs conseils, leur patience, et leur disponibilité. Merci Olivier Delaigue, pour ta formation et ton aide sur le logiciel R. J'ai beaucoup appris à vos côtés et je vous en suis très reconnaissant.

Je remercie aussi à toute l'unité HBAN d'IRSTEA Antony pour leur accueil chaleureux et leur bonne humeur.

Un grand merci pour ma famille pour toute la motivation et l'amour donné, même de loin.

Enfin, je remercie également à tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre, de près ou de loin, à la réalisation de ce présent mémoire.

Merci !

Sommaire

Abstract	
Remerciements	
Liste des figures	
I. Introduction.....	7
II. L’approche airGR.....	8
II.1 Le package airGR.....	8
II.2 Modèles hydrologiques GR.....	8
II.3 Modèle GR4J.....	9
II.3.1 La production :.....	10
II.3.2 Le routage :.....	10
II.4 Modèle CemaNeige.....	12
III. Forçages météorologiques et hydrologiques.....	13
III.1 Bassins versants en France.....	14
III.2 Bassins versants en Australie.....	15
III.3 Bassins versants aux États-Unis.....	15
IV. Objectif.....	17
V. Méthodologie.....	17
V.1 Recherche Bibliographique :.....	18
V.2 Modèle GR4J1UH.....	18
V.3 Calage et évaluation du modèle.....	19
V.4 Fonction-objectif.....	19
V.4.1 Nash-Sutcliffe (NSE) :.....	19
V.4.2 Kling-Gupta (KGE) :.....	20
V.4.3 PBIAS :.....	20
V.4.4 Percentiles d’erreur absolue :.....	21
V.4.5 Coefficient de corrélation (R^2) :.....	21
V.4.6 Différence des scores des fonctions objectives :.....	21
VI. Résultats.....	21
VI.1 Comparaison des critères :.....	22
VI.2 Comparaison des moyennes des critères de l’ensemble des bassins :.....	23
VI.3 Différence entre critères :.....	24
VI.4 Analyse des paramètres :.....	26
VI.5 Analyse des percentiles d’erreur absolue :.....	27
VI.6 Analyse de coefficient de corrélation :.....	29

VI.7 Comparaison des performances :	31
VII. Conclusions et perspectives :	33
VIII. Références bibliographiques :	34
Annexe.....	37
Résumé.....	51

Liste de Figures :

<i>Figure 1 Schéma du modèle pluie-débit GR4J (Perrin et al., 2000).</i>	9
<i>Figure 2 Courbe hypsométrique et discrétisation spatiale en 5 bandes d'altitude.</i>	13
<i>Figure 3 Emplacement des 605 bassins français d'étude sur l'ensemble des zones hydrographiques d'ordre 4 (Sandre, 2002).</i>	14
<i>Figure 4 Emplacement des 209 bassins australiens d'étude sur l'ensemble des zones hydrographiques (Vaze et al, 2011).</i>	15
<i>Figure 5 Emplacement des 416 bassins aux États-Unis sur l'ensemble des zones hydrographiques (Wagener et al, 2006).</i>	16
<i>Figure 6 Résumé des caractéristiques des bassins étudiés.</i>	17
<i>Figure 7 Schéma du modèle pluie-débit GR4J1UH.</i>	18
<i>Figure 8 Méthode du split-sample test (Klemeš, 1986).</i>	19
<i>Figure 9 Analyse des critères NSE sur les débits non transformés, NSE(Q), des bassins de la France.</i>	22
<i>Figure 10 Analyse des critères KGE(Q) des bassins de la France.</i>	23
<i>Figure 11 Analyse des moyennes des critères avec critère NSE(Q) des bassins de la France.</i>	24
<i>Figure 12 Différence des critères NSE(Q) sur P1 calage des bassins de la France.</i>	25
<i>Figure 13 Différence des critères NSE(Q) sur P2 validation des bassins de la France.</i>	26
<i>Figure 14 Analyse des paramètres avec critères NSE(Q) des bassins de la France.</i>	27
<i>Figure 15 Analyse des bas débits (Q₀₅) avec critère NSE(Q) des bassins de la France.</i>	28
<i>Figure 16 Analyse des débits moyens (Q₅₀) avec critère NSE (Q) des bassins de la France.</i>	28
<i>Figure 17 Analyse des hauts débits (Q₉₅) avec critère NSE(Q) des bassins de la France.</i>	29
<i>Figure 18 Analyse du coefficient de corrélation avec critère NSE(Q) des bassins de la France.</i>	30
<i>Figure 19 Analyse du coefficient de corrélation avec critère KGE sur les débits non transformés, KGE(Q), des bassins de la France.</i>	31
<i>Figure 20 Comparaison des performances NSE avec calibration sur haut débit pour bassins de la France</i>	32
<i>Figure 21 Comparaison des performances NSE avec calibration sur débit moyenne pour bassins de la France.</i>	32
<i>Figure 22 Comparaison des performances NSE avec calibration sur bas débit pour bassins de la France.</i> .	32

<i>Figure 23</i> Analyse des critères $NSE(Q)$ des bassins en Australie.	37
<i>Figure 24</i> Analyse des critères $KGE(Q)$ des bassins en Australie.	38
<i>Figure 25</i> Analyse des critères $NSE(Q)$ des bassins aux États-Unis.....	38
<i>Figure 26</i> Analyse des critères $KGE(Q)$ des bassins aux États-Unis.....	38
<i>Figure 27</i> Analyse des moyennes des critères avec critère $NSE(Q)$ des bassins en Australie.	39
<i>Figure 28</i> Analyse des moyennes des critères avec critère $NSE(Q)$ des bassins aux États-Unis.....	40
<i>Figure 29</i> Différence des critères $NSE(Q)$ sur P1 calage des bassins en Australie.....	41
<i>Figure 30</i> Différence des critères $NSE(Q)$ sur P2 validation des bassins en Australie.	41
<i>Figure 31</i> Différence des critères $NSE(Q)$ sur P1 calage des bassins aux États-Unis.	42
<i>Figure 32</i> Différence des critères $NSE(Q)$ sur P2 validation des bassins aux États-Unis.....	42
<i>Figure 33</i> Analyse des paramètres avec critères $NSE(Q)$ des bassins en Australie.....	43
<i>Figure 34</i> Analyse des paramètres avec critères $NSE(Q)$ des bassins aux États-Unis.	44
<i>Figure 35</i> Analyse des bas débits (Q_{05}) avec critère $NSE(Q)$ des bassins en Australie.....	45
<i>Figure 36</i> Analyse des débits moyens (Q_{50}) avec critère $NSE(Q)$ des bassins en Australie.	45
<i>Figure 37</i> Analyse des hauts débits (Q_{95}) avec critère $NSE(Q)$ des bassins en Australie.....	45
<i>Figure 38</i> Analyse des bas débits (Q_{05}) avec critère $NSE(Q)$ des bassins aux États-Unis.	46
<i>Figure 39</i> Analyse des débits moyens (Q_{50}) avec critère $NSE(Q)$ des bassins aux États-Unis.....	46
<i>Figure 40</i> Analyse des hauts débits (Q_{95}) avec critère $NSE(Q)$ des bassins aux États-Unis.	46
<i>Figure 41</i> Analyse du coefficient de corrélation avec critère $NSE(Q)$ des bassins en Australie.	47
<i>Figure 42</i> Analyse du coefficient de corrélation avec critère $NSE(Q)$ des bassins aux États-Unis.....	48
<i>Figure 43</i> Comparaison des performances NSE avec calibration sur haut débit des bassins en Australie....	49
<i>Figure 44</i> Comparaison des performances NSE avec calibration sur débit moyenne des bassins en Australie.	49
<i>Figure 45</i> Comparaison des performances NSE avec calibration sur bas débit des bassins en Australie	49
<i>Figure 46</i> Comparaison des performances NSE avec calibration sur haut débit des bassins aux États-Unis.	50
<i>Figure 47</i> Comparaison des performances NSE avec calibration sur débit moyenne des bassins aux États- Unis.	50
<i>Figure 48</i> Comparaison des performances NSE avec calibration sur bas débit des bassins aux États-Unis.	50

I. Introduction

Il est prévu que la quantité et la diversité des défis liés à l'eau augmentent à l'avenir. La pertinence et l'ampleur de ces défis sont spécifiques au lieu et au moment ils émergent, à l'arrivée d'événements extrêmes (sécheresses et inondations), à la croissance économique et démographique, à la dynamique des glaciers et leur capacité pour alimenter en eau les vallées environnantes.

Les modèles hydrologiques sont des outils qui nous aident à comprendre, à explorer et à analyser ces processus, et à évaluer les options de gestion durable. Les résultats de la modélisation constituent une information précieuse pour la prise de décision stratégique ou en temps réel. Parmi les différents modèles hydrologiques développés, on peut définir trois types (**Singh et al., 1995 et Ponce et al., 1989**) : 1) empiriques (ou boîte noire), où la solution est basée sur des paramètres empiriques, calculés par l'identification de relations statistiquement significatives entre certaines variables, 2) théoriques, qui sont décrits par des équations différentielles et suivent les lois de la physique et/ou de processus chimiques, 3) conceptuels, qui sont des représentations simplifiées des processus physiques, en termes mathématiques et simulent des processus complexes basées sur des paramètres clefs conceptuels. La sélection du modèle est déterminée par le but de l'étude, le choix du type des bassins versants et la disponibilité des données (**Xu et Singh, 2004**).

La capacité de la majorité des modèles hydrologiques à reproduire la réalité n'est pas parfaite. Ainsi, anticiper les impacts du changement climatique peut devenir difficile. En effet, plusieurs études (**Vaze et al. (2010), Coron et al. (2012)**) ont montré le manque de robustesse des modèles, produisant des forts biais entre les débits simulés et observés. La robustesse est souvent définie comme la capacité d'une méthode d'avoir de bons résultats dans une vaste gamme de situations et dans des conditions non optimales (**Ouarda et Ashkar, 1998**), notamment sur des périodes différentes de celles du calage. Les causes des conditions non optimales des modèles hydrologiques peuvent venir de la qualité et de la disponibilité de données, comme par exemple des séries courtes et données manquantes pour certains processus comme l'interaction nappe-rivière. De même, la simplification d'ordre numérique, puisque dans certains modèles les équations différentielles non linéaires qui décrivent la plupart des processus sont résolues par des algorithmes discrétisant l'espace et le temps, ainsi que la non-représentation de certains processus, peut réduire la robustesse des modèles. La modélisation pluie-débit permet la simulation des débits, dans un certain intervalle de temps dans un bassin déterminé, à partir de données observées pour prédire des événements extrêmes (crues et étiages) et leur probabilité d'apparition. Cependant, l'inconvénient de cette méthode est qu'il est difficile d'obtenir une simulation qui soit efficace dans les deux domaines, ce qui signifie qu'il n'existe pas un modèle hydrologique « parfait » (**Sittner (1976), Perrin et al. (2001)**). Une façon possible d'améliorer la simulation des débits est d'utiliser les structures de modèles existants comme point de départ, puis essayez de modifier graduellement. (**Perrin et al., 2003**).

L'IRSTEA a récemment regroupé plusieurs de ses modèles pluie-débit (les modèles GR) dans un package R, airGR (**Coron, 2017a, 2017b**). J'ai utilisé cet outil durant mon stage, pour tenter de l'améliorer en travaillant le modèle GR4J. A partir du retour d'expérience de Mathevet (**2005**) sur le modèle hydrologique GR5H, qui a proposé une simplification dans le structure de routage à travers de l'utilisation d'un seul hydrogramme unitaire à deux branches, et aussi à partir de la structure d'un hydrogramme unitaire du modèle GR5J (**Le Moine, 2008**), nous avons opté pour la tester sur le modèle GR4J. Pour cela, la performance du package airGR (**Coron, 2017a, 2017b**) a été évalué sur un large échantillon de bassins versants avec des conditions hydro-climatiques différentes. Le but est d'identifier des améliorations du modèle GR4J pour des événements hydrologiques variés comme les crues (hauts débits) et les étiages (bas débits).

II. L'approche airGR

II.1 Le package airGR

airGR est un package R (**Coron, 2017a, 2017b**) qui contient les modèles hydrologiques GR développés dans l'équipe d'Hydrologie des bassins versants (<http://webgr.irstea.fr/>) de l'unité de recherche Hydrosystèmes et Bioprocédés - HBAN du centre IRSTEA d'Antony (France). La version 1.0.5.12 contient ces modèles avec leurs structures d'origine. airGR permet de simuler la transformation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant, grâce aux six modèles GR et un modèle d'accumulation de neige, à partir de séries chronologiques de précipitations, d'évapotranspiration potentielle, de températures et des débits observés sur des bassins versants. Les sorties de ce package sont des séries de débits simulés à différents pas de temps selon le modèle utilisé (horaire, journalier, mensuel, annuel), des critères numériques de performance, des sorties graphiques et les variables internes des modèles. (**Perrin et al., 2009**).

Le package airGR a été conçu pour mettre en œuvre facilement les modèles GR sur de nombreux bassins d'étude, pour faciliter l'utilisation par les utilisateurs novices, et pour permettre une certaine souplesse en ce qui concerne l'ajout par l'utilisateur de modèles hydrologiques, de critères d'efficacité, ou d'algorithmes de calage. Le package comprend une procédure de calage et un jeu de critères d'évaluation de performance. Il est principalement basé sur trois familles de fonctions : 1) modèles hydrologiques, 2) critères d'évaluation et 3) algorithme de calibration (Voir Annexe IX.1). airGR permet également de travailler avec les modèles hydrologiques seuls ou couplés avec un modèle de fonte et d'accumulation de neige (CemaNeige). Ce modèle de neige peut également être utilisé seul. Par ailleurs, afin d'assurer un faible temps de calcul, chaque cœur de modèle est codé en Fortran. Leur encapsulage ainsi que les autres fonctions (principalement l'algorithme de calage et les critères d'évaluation) sont codés en R.

II.2 Modèles hydrologiques GR

Depuis plus de trente ans, l'équipe Hydrologie des bassins versants d'IRSTEA a développé les modèles hydrologiques connus sous le nom de « modèles GR » (Génie Rural) (**Michel, 1983**). Les modèles GR (GR4H, GR4J, GR5J, GR6J, GR2M, GR1A) permettent de prédire au mieux les débits des cours d'eau sur une grande variété de bassins versants. Ils ont été développés avec un objectif d'efficacité et de robustesse, conduisant à des structures parcimonieuses et nécessitant peu de données d'entrée, et qui sont aisément disponibles, à savoir les précipitations, la température et les débits (**Perrin et al., 2003**). Ces modèles permettent de travailler à différents pas de temps, mais aussi dans des contextes d'utilisations variés comme par exemple : l'évaluation de la ressource en eau, la prévision des crues et des étiages et les projections hydrologiques en climat futur. Chaque modèle a un certain nombre de paramètres à optimiser. Ce nombre est en général faible, ce qui permet d'éviter les problèmes liés à la sur-paramétrisation et réduit considérablement les temps de calcul.

Les modèles GR sont des modèles pluie-débit de type conceptuel et global. Le terme « conceptuel » signifie qu'ils représentent le fonctionnement hydrologique des bassins versants avec une complexité limitée (évapotranspiration, ruissellement, pertes souterraines), sans prendre en compte les caractéristiques physiques des bassins versants. Le terme « global » signifie qu'ils peuvent être définis comme un modèle à une dimension qui intègre les processus hydrologiques sur les trois dimensions spatiales du bassin versant pour calculer un débit à son exutoire. (**Kampf et al., 2007**), c'est à dire à l'échelle du bassin versant. Ces modèles sont aussi appelés modèles à réservoirs, car le bassin est représenté comme un assemblage de réservoirs interconnectés décrits par des équations de bilan et des lois de vidange. Ils sont composés d'un module de production, assurant les bilans en

eau (rapport stockage/évapotranspiration/écoulements) et d'un module de transfert, gérant la participation temporelle des écoulements sur le bassin (**Terrier, 2016**). Cependant, ces modèles sont une représentation très simplifiée du fonctionnement réel du bassin et l'interconnexion des réservoirs et les lois de vidanges utilisées sont le plus souvent issues d'une approche empirique, car elles sont basées sur la relation existante entre les données d'entrée et de sortie de l'hydrosystème (**Hingray et al., 2009**). Pour cette étude, nous avons présélectionné le modèle GR4J.

II.3 Modèle GR4J

Le modèle GR4J est un modèle conceptuel global journalier à 4 paramètres (**Perrin et al. 2000**). Son développement a été initié à l'IRSTEA au début des années 1980 avec l'objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit fiable en vue d'utilisations pour des applications de gestion de la ressource en eau. Le modèle GR4J considère le bassin versant comme une entité globale et il n'utilise pas *a priori* des équations physiques (empiriques). GR4J n'a besoin que d'un nombre réduit de données hydrométriques et d'informations sur le bassin, comme les pluies et l'évapotranspiration potentielle (ETP) exprimés en moyenne journalière sur le bassin, les débits moyens journaliers à l'exutoire et la superficie du bassin versant. L'ETP joue un double rôle, car elle permet de compenser les erreurs d'estimation sur les variables de forçage et l'inéquation éventuelle de la fonction de rendement du modèle.

GR4J est un modèle simple mais efficace. Il est constitué d'un réservoir de production, d'un réservoir de routage, des hydrogrammes unitaires et d'une fonction d'ouverture sur l'extérieur non atmosphérique qui utilise un terme source/puits censé représenter les échanges avec les nappes profondes. Ils sont les 4 paramètres à caler définis comme :

- X_1 : capacité maximale du réservoir de production (mm/jour).
- X_2 : coefficient d'échange souterrain (mm).
- X_3 : capacité maximale du réservoir de routage (mm).
- X_4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire (jours).

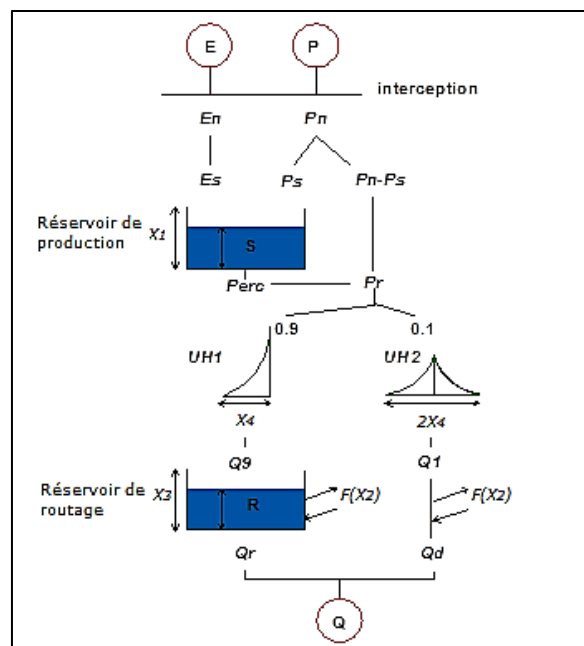


Figure 1 Schéma du modèle pluie-débit GR4J (Perrin et al., 2000).

Où P : hauteur de la pluie sur le bassin en mm.

E : évapotranspiration potentielle (ETP) en mm.

Les relations entre les 4 paramètres sont expliquées grâce à des équations intégrées sur un pas de temps.

II.3.1 La production :

La production évalue la partie des précipitations qui alimente les eaux de ruissellement à l'exutoire du bassin versant, ainsi que la partie qui s'évapore. Pour employer le modèle GR4J il faut tout d'abord déterminer une pluie nette Pn et une évapotranspiration nette En . Elles sont calculées par :

- **Cas 1** : Si $P > E$, alors $Pn = P - E$ et $En = 0$
- **Cas 2** : Si $P < E$, alors $Pn = 0$ et $En = E - P$

Cas 1 : Si Pn est différente de zéro, une partie Ps (pluie spécifique) de Pn alimente le réservoir de production. Elle est calculée par :

$$Ps = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S}{X_1} \right)^2 \right) \cdot \tanh \left(\frac{Pn}{X_1} \right)}{1 + \left(\frac{S}{X_1} \right) \cdot \tanh \left(\frac{Pn}{X_1} \right)}$$

Cas 2 : Si En est différent de zéro, une quantité d'évaporation Es est retirée du réservoir de production. Elle est donnée par :

$$Es = \frac{S \left(2 - \frac{S}{X_1} \right) \cdot \tanh \left(\frac{En}{X_1} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{X_1} \right) \cdot \tanh \left(\frac{En}{X_1} \right)}$$

Avec S , niveau du réservoir de production (mm).

Quel que soit le cas, le contenu du réservoir est initialement mis à jour par : $S = S - Es + Ps$

Ensuite une percolation $Perc$ issue du réservoir de production est calculée :

$$Perc = S \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4S}{9X_1} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\}$$

Après, le contenu du réservoir est de nouveau mis à jour par : $S = S - Perc$

Le réservoir peut être vidé par deux chemins distincts à savoir l'évapotranspiration et la percolation.

Alors, la quantité d'eau Pr (pluie qui ruisselle) qui arrive finalement dans la partie routage du modèle est : $Pr = Perc + (Pn - Ps)$

II.3.2 Le routage :

Le réservoir de routage cherche à modéliser la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol. Avant d'arriver au réservoir de routage, Pr est divisé en deux composantes d'écoulement :

- 1) 90 % étant routés par un hydrogramme unitaire $HU1$ et un réservoir de routage.
- 2) 10 % par un unique hydrogramme unitaire $HU2$.

$HU1$ et $HU2$ dépendent du même paramètre X_4 qui est le temps de base de $HU1$ exprimé en jours. L'hydrogramme unitaire distribue temporellement les volumes d'eau venant du réservoir de production. Plus le paramètre est grand, plus l'hydrogramme s'étendra dans le temps et donc plus la réponse pluvieuse, restituée sous forme de débit, sera lissée dans le temps.

Le réservoir de routage est alimenté par le volume d'eau restitué à la sortie de l'hydrogramme $HU1$, dont la capacité maximum est déterminée par le paramètre X_3 en mm. $HU2$ gère le transfert de 10 % d'eau restant vers l'exutoire.

Les ordonnées des hydrogrammes sont calculées à partir des cumuls de la proportion de la pluie unitaire traitée par l'hydrogramme (courbes en « S »), notées respectivement $SH1$ et $SH2$, les deux sont définies en fonction du temps selon les conditions suivantes :

$SH1$:

- Pour $t = 0$, $SH1(t) = 0$
- Pour $0 < t < X_4$, $SH1(t) = (t/X_4)^{(5/2)}$
- Pour $t > X_4$, $SH1(t) = 1$

$SH2$:

- Pour $t = 0$, $SH2(t) = 0$
- Pour $0 < t < X_4$, $SH2(t) = (1/2) \cdot (t/X_4)^{(5/2)}$
- Pour $X_4 < t < 2 X_4$, $SH2(t) = 1 - (1/2) \cdot (2 - t/X_4)^{(5/2)}$
- Pour $t > 2 X_4$, $SH2(t) = 1$

Les ordonnées de $HU1$ et $HU2$ sont alors calculées par :

- $HU1(j) = SH1(j) - SH1(j-1)$
- $HU2(j) = SH2(j) - SH2(j-1)$. Où « j » est un entier.

L'eau transférée, soit vers le réservoir de routage, soit directement à l'exutoire, est également soumise à une fonction d'échange avec le sous-sol, grâce à un coefficient d'échange exprimé en mm. La fonction d'échange joue plusieurs rôles à la fois. Elle est à la base censée modéliser les échanges souterrains, mais a également un rôle de correction des volumes d'un pas de temps à l'autre ou bien prend en compte l'évapotranspiration au niveau des sols. La fonction d'échange est en

fonction du paramètre X_2 , dit paramètre d'échange mais également du paramètre X_3 , capacité maximale du réservoir de routage.

A chaque pas de temps i , les sorties Q_9 et Q_1 des deux hydrogrammes (selon la division de Pr : 90 % et 10 % respectivement) sont calculées par :

$$Q_1(i) = 0,1 \sum_{k=1}^m UH_2(k). Pr(i - k + 1)$$

Où : $1 = \text{int}(X_4) + 1$ et $= \text{int}(2X_4) + 1$, avec $\text{int}(\cdot)$ désignant la partie entière.

Un échange souterrain en eau (perte ou gain) est calculé par :

$$F = X_2 \left(\frac{R}{X_3} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Où R : niveau dans le réservoir

Le niveau dans le réservoir de routage est mis à jour en ajoutant la sortie Q_9 de l'hydrogramme HU_1 et F : $R = \max(0 ; R + Q_9 + F)$

Il se vidange ensuite en une sortie Q_r donnée par :

$$Q_r = R \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{X_3} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\}$$

Le niveau dans le réservoir devient : $R = R - Q_r$

La sortie Q_1 de l'hydrogramme HU_2 est soumise aux mêmes échanges pour donner la composante d'écoulement Q_d : $Q_d = \max(0 ; Q_1 + F)$

Le débit total Q est alors donné par : $Q = Q_r + Q_d$

Le routage a un rôle de reconstitution de la réponse hydrologique du bassin versant à une impulsion de pluie ; il modélise conceptuellement l'écoulement jusqu'à la rivière.

II.4 Modèle CemaNeige

Le modèle CemaNeige est un modèle degré-jour à 2 paramètres (d'accumulation et de la fonte de la neige), avec une approche empirique (Valéry, 2010), établi sur le modèle MOHYSE (Fortin et Turcotte, 2006). Il a l'objectif d'améliorer la modélisation des débits à l'exutoire des bassins versants en prenant en compte l'apport de neige, car une mauvaise estimation de la quantité de neige accumulée entraîne alors une moins bonne estimation des débits lorsque la fonte du manteau neigeux apparaît, et ceci peut entraîner une sous-estimation conséquente de la crue si ce phénomène de fonte nivale se cumule à un événement extrême de précipitations (Gosset, 2014).

Les paramètres de CemaNeige sont libres, car ils utilisent un algorithme d'optimisation pour déterminer leurs valeurs (Gosset, 2014). Le modèle CemaNeige est prévu pour être utilisé seul ou couplé avec un modèle pluie-débit de type GR. Il a été testé avec plusieurs modèles hydrologiques (GR4J et le modèle de prévision GRP) fonctionnant au pas de temps journalier (Nicolle, 2010).

Les 2 paramètres de CemaNeige sont les suivants :

- $CNX_1 = C_{TG}$, le **coefficient de pondération** (adimensionnel) de l'état thermique du manteau (-), compris entre 0 et 1.
- $CNX_2 = K_f$, le **facteur degré-jour**, connue aussi comme **facteur de fonte** ($\text{mm}/^\circ\text{C}/\text{jour}$), généralement compris entre 2 et 6 $\text{mm}/^\circ\text{C}/\text{jour}$.

CemaNeige est basé sur une discrétisation spatiale du bassin versant par l'altitude en cinq zones altitudinales d'égales surfaces qui permet de tenir compte des gradients orographiques et permet aussi une évolution différenciée du manteau neigeux. Ensuite, les données d'entrée (précipitations et température) sont extrapolées à chaque bande d'altitude notée z .

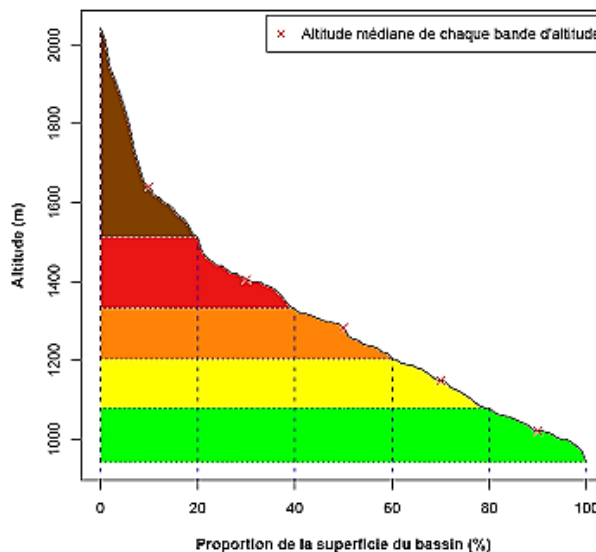


Figure 2 Courbe hypsométrique et discrétisation spatiale en 5 bandes d'altitude.

Le module possède deux fonctions de différenciation de la nature des précipitations (liquides et solides) selon l'altitude médiane du bassin versant considéré (**Valéry, 2010**) :

- **Fonction d'accumulation (gestion du stockage de la neige)** : Si l'altitude médiane du bassin versant est inférieure à 1500 m, la fraction solide des précipitations est fonction des températures minimales et maximales journalières pour une bande d'altitude donnée, où la neige est stockée au sein d'un réservoir conceptuel (initialisé à 0 mm) qui représente le manteau neigeux de la bande d'altitude. Cette fonction était utilisée dans les modules Hydrotel (**Turcotte et al., 2007**) ou PRMS (**Leavesley et Stannard, 1995**).
- **Fonction de fonte (la fonte de la neige)** : Si l'altitude médiane du bassin versant est supérieure à 1500 m, la fraction neigeuse des précipitations est fonction de l'intervalle de température $[-1 ; 3^\circ\text{C}]$, qui permet de calculer la lame de fonte écoulee, issue du stock de neige, qui va être intégrée au modèle hydrologique, en plus de la fraction liquide des précipitations. Cette fonction était déterminée empiriquement par l'USACE (US Army Corps of Engineers) en 1956.

III. Forçages météorologiques et hydrologiques

Nous avons étudié les résultats de la modélisation-pluie-débit sur 605 bassins en France, 209 en Australie et 416 aux États-Unis. Chaque bassin versant a sa propre période d'étude, mais elles sont

toutes comprises dans une période d'étude commune selon le pays : 30 ans pour la France (1898-2010), 30 ans pour l'Australie (1974-2006) et 53 ans pour les États-Unis (1948-2001).

Les données météorologiques et hydrologiques utilisées sont fournies par Météo-France (*SAFRAN*) (**Vidal et al., 2009**) et le *SCHAPI* (Banque Hydro : www.hydro.eaufrance.fr/) pour la France, par le CSIRO (Land and Water) (**Coron, 2013**) pour l'Australie, et par MOPEX (**Wagener et al., 2006**) pour les États-Unis.

III.1 Bassins versants en France

Nous avons travaillé sur 605 bassins versants répartis sur le territoire métropolitain de la France, exception faite de la Corse, provenant d'une base de données d'IRSTEA, utilisée précédemment par Laurent Coron (**2013**). Ces bassins sont présents dans l'ensemble des zones hydrographiques d'ordre 4 (**Sandre, 2002**), (Figure 03), situés sur une large zone couvrant les Alpes, le Massif-Central et les Pyrénées.

Les surfaces des bassins versants français que nous avons étudiés varie entre 5,29 km² et 26940 km², avec 704,50 km² de moyenne. La caractéristique de surface des bassins influe sur leurs réactions hydrologiques. Cette réaction est mesurée par l'observation de la quantité d'eau qui s'écoule à l'exutoire du système : plus le bassin est grand, plus le temps de réponse s'allonge. La détermination de l'altitude moyenne d'un pareil état offre l'occasion de fixer celles de ses grandes régions naturelles et la comparaison des chiffres obtenus pour préciser bien des contrastes intéressants. L'altitude moyenne du total de nos bassins, lequel est fixée à 1400 m. (**Catalogne, 2012**), varie entre 35 m et 2913 m, avec 534,5 m de moyenne. L'altitude maximum varie entre 75 m et 3997 m, avec 949,4 m de moyenne. En plus, 53 des bassins sont de très hautes montagnes avec une altitude maximum supérieure à 2000 m. Parmi ces 53 bassins versants de hautes montagnes, 24 sont de grandes surfaces. Dans les Alpes, le sud-est de la France, l'altitude moyenne est approximativement comprise entre 1 000 et 2 000 mètres (de nos 605 bassins versants 79 se trouvent à l'intérieur de cet intervalle).

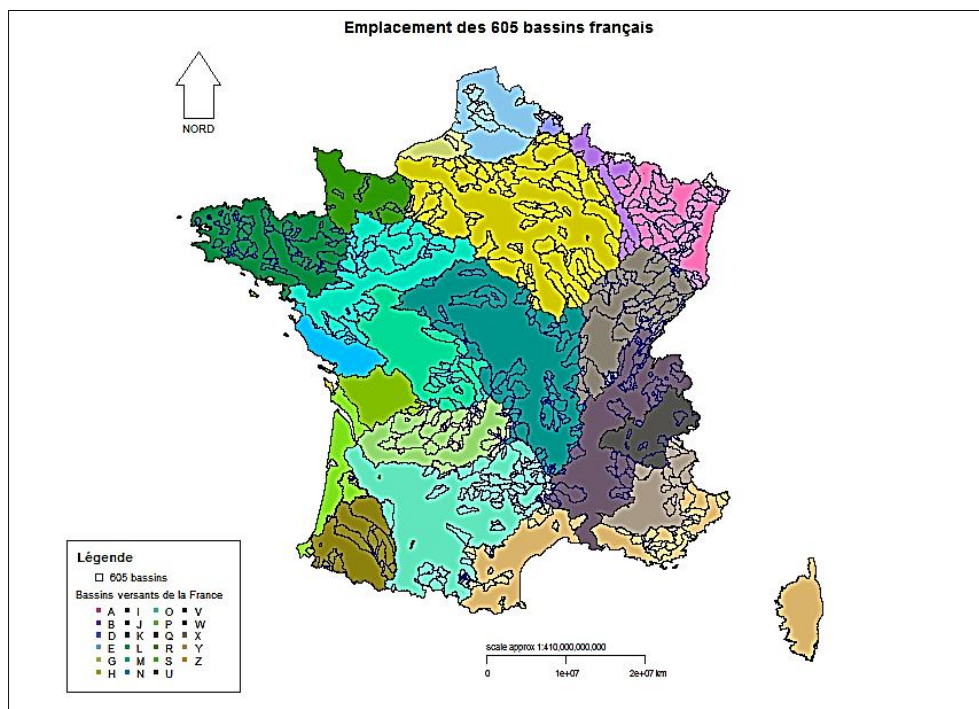


Figure 3 Emplacement des 605 bassins français d'étude sur l'ensemble des zones hydrographiques d'ordre 4 (**Sandre, 2002**).

III.2 Bassins versants en Australie

Nous avons travaillé sur 209 bassins australiens, qui sont décrit en détail par Vaze (2011). Ces bassins présentent une forte variabilité climatique au cours des dernières décennies, ils sont utilisées dans divers travaux de recherche australiens sur la ressource en eau et ses évolutions face au changement climatique. Ces bassins sont répartis le long de la *Great Dividing Range* (Alpes australiennes), selon la Figure 04. La majorité de cet échantillon est située dans les états fédéraux de New-South-Wales et de Victoria, avec un débordement sur les états du Queensland (pour les bassins les plus au nord) et de South-Australia (pour les bassins les plus à l'Ouest).

Parmi les 209 bassins versants, 2 sont de très haute montagne avec leur station de mesure à plus de 2000 m d'altitude, et 113 bassins avec une superficie supérieure à 300 km². La surface totale des bassins varie entre 51 km² et 2000 km², avec 460 km² de moyenne. L'altitude moyenne est comprise entre 56 et 1396 mètres, avec 559 mètres de moyenne. L'altitude maximum varie entre 139 et 2184 mètres, avec 1007 mètres de moyenne.

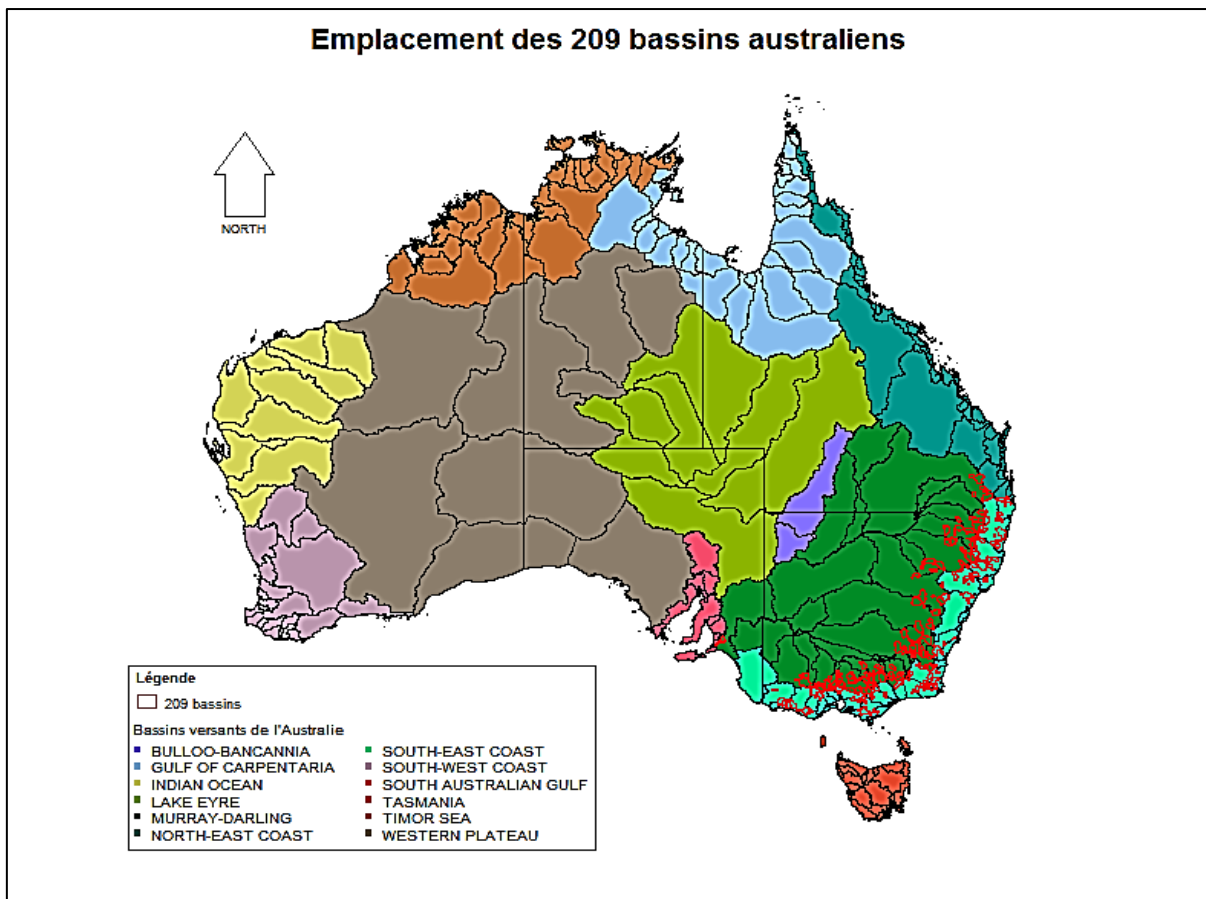


Figure 4 Emplacement des 209 bassins australiens d'étude sur l'ensemble des zones hydrographiques (Vaze et al, 2011).

III.3 Bassins versants aux États-Unis

Nous avons travaillé sur 416 bassins aux États-Unis, les mêmes que ceux étudiés par Wagener, (2006) (Figure 05). Parmi les 416 bassins versants, 60 sont de très hautes montagnes avec leur station de mesure à plus de 2000 m d'altitude, et 397 bassins avec une superficie supérieure à

300 km². La surface des bassins varie entre 67,3 et 10330 km², avec 3023 km² de moyenne. L'altitude moyenne est comprise entre 16 et 3218 mètres, avec 591 mètres de moyenne. L'altitude maximum varie entre 64 et 4323 mètres, avec 1006 mètres de moyenne.

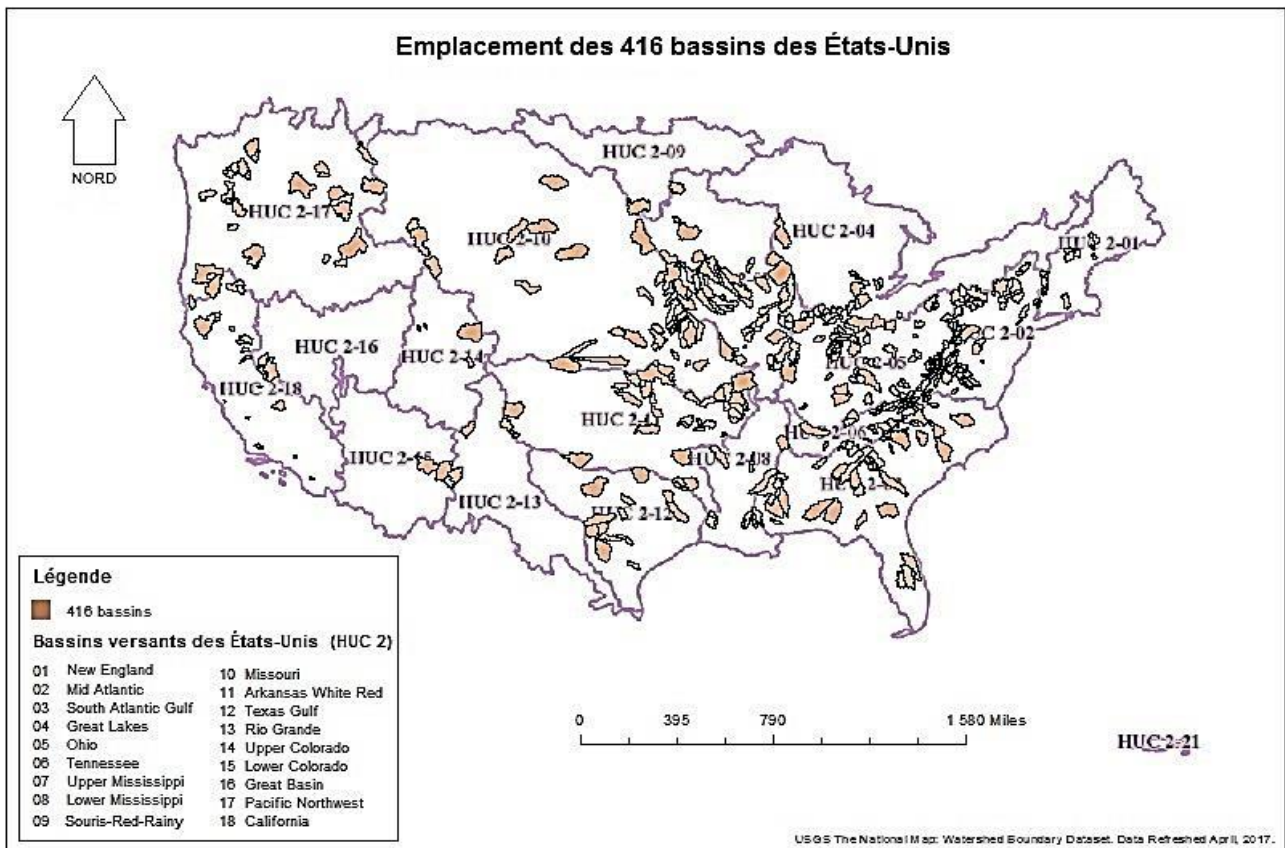


Figure 5 Emplacement des 416 bassins aux États-Unis sur l'ensemble des zones hydrographiques (Wagner et al, 2006).

Les échantillons de bassins versants que nous avons constitués présentent une grande diversité de situations. Ceci est illustré par la Figure 06 qui fournit les distributions des superficies et altitudes médianes, des volumes de précipitations et évapotranspirations potentielles annuelles moyennes des bassins. Les distributions des précipitations annuelles ont des formes comparables, mais sont décalées d'environ 200 mm. Au-delà d'une différence climatique, ce décalage provient sans doute des effets altitudinaux. Les différences importantes constatées sur les évapotranspirations potentielles reflètent en revanche un écart notable des conditions climatiques entre nos échantillons. L'écart entre les ETP est sans doute causé par des amplitudes entre les mois d'été et les mois d'hiver, où les températures en montagne diminuent fortement, faisant chuter l'ETP.

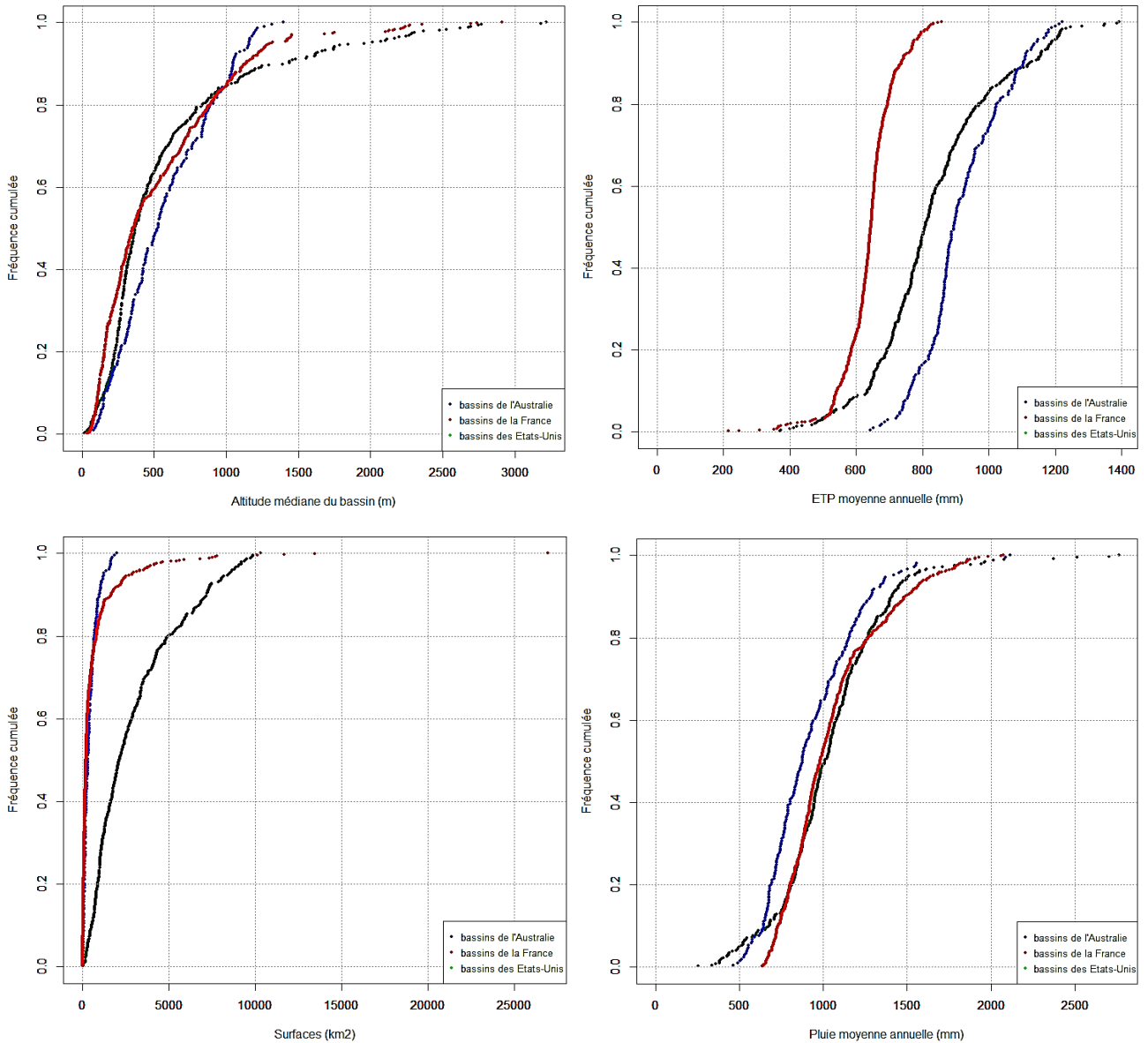


Figure 6 Résumé des caractéristiques des bassins étudiés.

IV. Objectif

Le but de ce stage est d'améliorer le package airGR en travaillant avec le modèle GR4J avec 1 et 2 hydrogrammes unitaires sur un large échantillon de bassins versants avec des conditions hydro-climatiques variées. Notamment en identifiant des améliorations pour des événements hydrologiques variés comme les crues (hauts débits) et les étiages (bas débits).

V. Méthodologie

V.1 Recherche Bibliographique :

La première partie du stage a été consacrée à la recherche bibliographique des études liées au sujet et à la compréhension du package airGR et des modèles hydrologiques GR et de neige (CemaNeige) qu'il contient.

Concernant le jeu de données, nous n'avons conservé que les bassins ne présentant aucune lacune de précipitation.

V.2 Modèle GR4J1UH

La deuxième partie, pour ce qui est du fond de la question, concerne le test de la version originale du modèle GR4J, seul pour l'Australie (car ses bassins ne présentent pas d'influence de la neige) et couplé avec CemaNeige pour la France et les États-Unis avec ses deux paramètres fixés à leur valeur médiane (K_f à 4,5 et CTG à 0,2) trouvée par **Nicolle (2010)**, car ce sont des bassins peu enneigés (**Gosset, 2014**).

Sur les mêmes bassins, nous avons également testé le modèle GR4J modifié, à 1 hydrogramme unitaire (GR4J1UH). Cette nouvelle structure de GR4J à 1 hydrogramme est structurellement cohérente à la version de GR5J présente dans airGR. Cette modification a été implémentée dans une nouvelle version du package airGR (1.0.7.1), ce qui nous a amené à apporter diverses modifications dans de nombreuses fonctions du package afin de faire cohabiter les différentes versions (à 1 ou 2 hydrogrammes unitaires) de GR4J (avec ou sans CemaNeige).

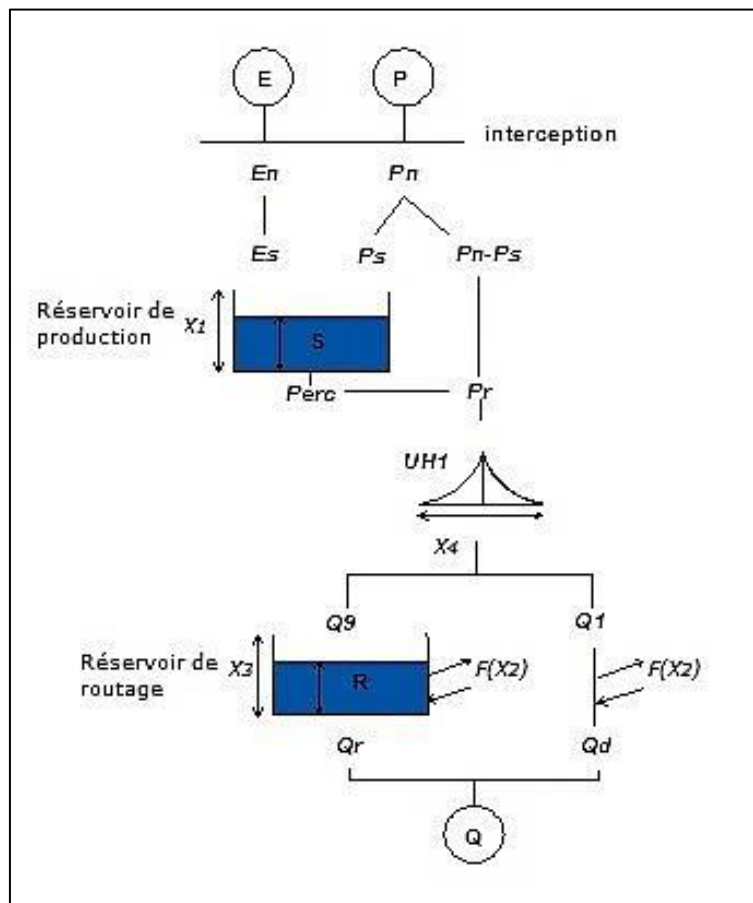


Figure 7 Schéma du modèle pluie-débit GR4J1UH.

V.3 Calage et évaluation du modèle

La troisième partie de ce stage a été consacrée à la visualisation et à la comparaison des résultats issus des différentes versions de GR4J afin d'évaluer la nouvelle performance du package airGR et d'élaborer des pistes sur de possibles améliorations.

Le processus de calage consiste à tester différents jeux de paramètres de manière à obtenir celui qui minimisera l'écart entre des débits observés et des débits simulés. L'objectif du calage est d'apprendre au modèle à identifier les propriétés hydrologiques du bassin versant.

Pour caler le modèle GR4J, nous avons appliqué la méthode du *split-sample test* (Klemeš, 1986), qui permet d'étudier la transférabilité des paramètres du modèle dans le temps. Il consiste à diviser la longueur totale des données de séries chronologiques de chaque bassin versant en deux sous-périodes indépendantes de la même taille (P1 et P2). Ensuite, le modèle est calé sur P1 et validé sur P2, et *vice-versa*.

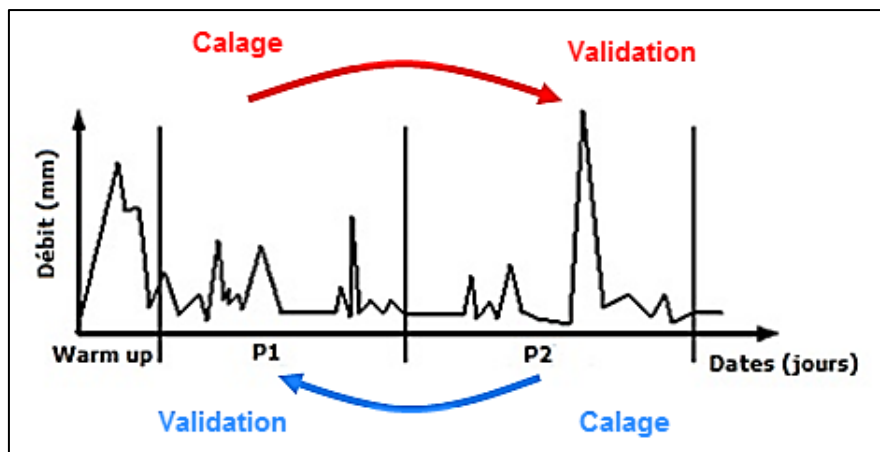


Figure 8 Méthode du *split-sample test* (Klemeš, 1986).

L'optimisation (calage) des paramètres du modèle, afin de minimiser l'erreur du modèle, nécessite la définition d'une fonction-objectif quantifiant l'erreur du modèle, c'est-à-dire la mesure de l'écart entre les débits simulés et les débits observés.

V.4 Fonction-objectif

Les fonctions objectives utilisées lors du calage sont :

V.4.1 Nash-Sutcliffe (NSE) :

La fonction-objectif NSE (Nash and Sutcliffe, 1970) s'appuie sur le rapport entre l'erreur du modèle et l'écart du débit observé à sa moyenne. Cette fonction-objectif peut être calculé sur la racine carrée des débits pour les débits moyens, sur le logarithme des débits pour des bas débits, et sur les débits pour les hauts débits. La formule de la fonction-objectif NSE sur les débits est la suivante :

$$NSE(Q) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{cal,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

Avec $\varepsilon = \overline{Q_{obs}} / 40$ pris au cas où il existerait un débit nul (**Perrin , 2000**).

Le NSE proche de 1 indique un modèle très performant, et un NSE négatif pour une performance moindre, lorsque les écarts sont importants. L'algorithme de calage permet une exploration exhaustive de l'espace des paramètres ainsi qu'une recherche locale de l'optimum (**Mathevet, 2005**).

V.4.2 Kling-Gupta (KGE) :

La fonction-objectif KGE (**Gupta et al., 2009**) donne qu'une indication sur les performances globales du modèle à produire des débits proches de ceux de références. Le KGE varie entre $-\infty$ et 1. Plus il est proche de 1, plus les débits simulés sont proches des débits de référence. Nous avons utilisé la fonction-objectif KGE sur la racine carrée des débits pour les débits moyens, sur le logarithme des débits pour les bas débits, et sur les débits pour les hauts débits. La fonction-objectif KGE se présente sous la forme suivante :

$$KGE(Q) = 1 - \sqrt{(\rho - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

Où :

$$\alpha = \frac{\sqrt{\sum_i (Q_{sim}(i) - \overline{Q_{sim}})^2}}{\sqrt{\sum_i (Q_{réf}(i) - \overline{Q_{réf}})^2}}, \quad \beta = \frac{\sum_i Q_{sim}(i)}{\sum_i Q_{réf}(i)}$$

$$\rho = \frac{\sum_i (Q_{sim}(i) - \overline{Q_{sim}}) \cdot (Q_{réf}(i) - \overline{Q_{réf}})}{\sqrt{\sum_i (Q_{sim}(i) - \overline{Q_{sim}})^2 \sum_i (Q_{réf}(i) - \overline{Q_{réf}})^2}}$$

$Q_{sim}(i)$ et $Q_{réf}(i)$ sont respectivement le débit simulé et le débit de référence au jour i . Q_{sim} et $Q_{réf}$ correspondent à la moyenne sur l'ensemble de la période considéré. ρ , α et β sont respectivement le rapport des écarts-types, le rapport de volume et le rapport de corrélation.

Ensuite, afin d'évaluer la qualité de nos résultats, nous avons analysé les débits observés et les critères d'évaluations. Pour cela, plusieurs scores ont été calculés comme :

V.4.3 PBIAS :

Le PBIAS est le biais du modèle, ou erreur de bilan, exprimée en pourcentage. Il indique s'il y a surestimation ou sous-estimation du débit moyen par le modèle sur une période. Un $Biais > 1$ si surestimation, $Biais < 1$ si sous-estimation et $Biais = 1$, donc PBIAS égal à 100 %, pour un bilan parfait.

$$PBIAS = [\Sigma(i)/\Sigma i Q_{réf}(i)] * 100$$

V.4.4 Percentiles d'erreur absolue :

V.4.4.1 Rapport des Q05 (bas débits) : Le cinquième percentile du débit, Q_{05} , correspond à une valeur de débit qui n'est pas dépassée par 5 % de nos débits. Q_{05} est donc un indicateur sur les bas débits. En calculant le rapport entre les Q_{05} simulés et de référence, nous avons R_{05} inférieur à 1 si les bas débits simulés sont inférieurs aux débits de référence et R_{05} supérieur à 1 dans le cas contraire. Un rapport égal à 1 correspond au cas parfait où les deux percentiles sont égaux.

$$R_{05} = \frac{Q_{05 \text{ sim}}}{Q_{05 \text{ réf}}}$$

V.4.4.2 Rapport des Q50 (les débits moyens) : Le cinquantième percentile, Q_{50} , correspond à une valeur de débit qui n'est pas dépassée 50 % du temps et donne donc une indication sur les débits « moyens ». L'interprétation du critère est la même que pour le Q_{05} :

$$R_{50} = \frac{Q_{50 \text{ sim}}}{Q_{50 \text{ réf}}}$$

V.4.4.3 Rapport des Q95 (hauts débits) : Le quatre-vingt quinzième percentile, Q_{95} , correspond à une valeur de débit qui n'est pas dépassée 95 % du temps et donne donc une indication sur les hauts débits.

$$R_{95} = \frac{Q_{95 \text{ sim}}}{Q_{95 \text{ réf}}}$$

V.4.5 Coefficient de corrélation (R^2) : Le coefficient de corrélation évalue la justesse du système de prévision en regardant la corrélation entre deux séries temporelles. C'est-à-dire il évalue la corrélation entre les débits observés et les débits simulés. Ce score est sans unité et s'étend entre 1 et 0, avec 1 comme meilleur score de qualité. Il est appliqué à chaque échéance de la période d'étude.

V.4.6 Différence des scores des fonctions objectives : Pour étudier la différence entre les modèles.

VI. Résultats

VI.1 Comparaison des critères :

Nous avons fait la comparaison des critères de tous les bassins de chaque pays pour chaque modèle, en indiquant, avec des points de couleur noir pour les valeurs des abscisses égal aux valeurs des ordonnées, avec des points de couleur rouge pour les valeurs des abscisses inférieures aux valeurs des ordonnées, et avec des points de couleur verte pour les valeurs des abscisses supérieures aux valeurs des ordonnées.

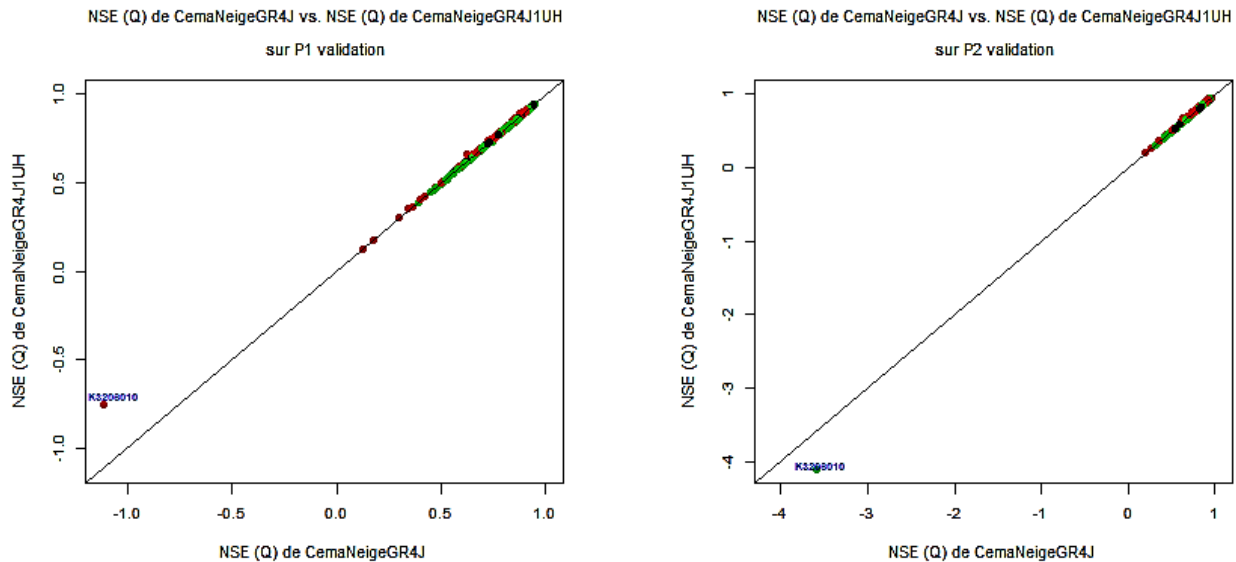


Figure 9 Analyse des critères NSE sur les débits non transformés, $NSE(Q)$, des bassins de la France.

Dans la Figure 9, dirigé plus précisément pour les hauts débits avec $NSE(Q)$, on voit des valeurs similaires des critères pour les deux modèles, même situation pour P1 et P2. On remarque que le bassin identifié comme K3206010 (Figure 9) présente sur P1 le critère obtenu avec le modèle des deux hydrogrammes unitaires inférieur au critère avec le modèle d'un hydrogramme unitaire. Cas contraire sur P2. Ce comportement du même bassin sur deux périodes différentes est lié à la différence de variabilité de pluie dans chaque période.

En regardant plus précisément le bassin K3206010 (Figure 9), on voit qu'il présente des critères négatifs NSE, pour cela on peut déduire que le bassin présente une surface petite. Ensuite, grâce à nos basses des données on constate que le bassin K3206010 (Figure 9) correspond au bassin La source de chez Pierre à Ceyssat et il présente 8,19 km² de surface. Ce bassin est situé sur un aquifère volcanique, qui permet une infiltration lente et par conséquent un écoulement rapide.

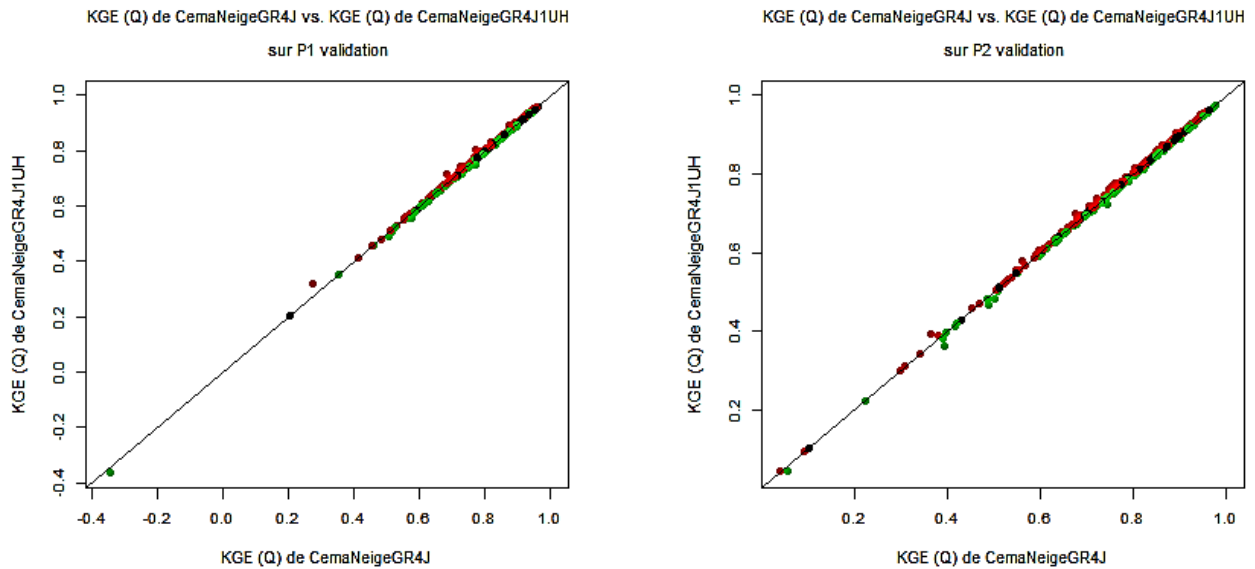


Figure 10 Analyse des critères $KGE(Q)$ des bassins de la France.

Dans le Figure 10, dirigé plus précisément pour les hauts débits avec $KGE(Q)$, on voit des valeurs similaires des critères pour les deux modèles, même situation sur P1 et P2.

En général, pour tous les pays on a des valeurs similaires des critères par les deux modèles. Par rapport à fonctions objectives, on a aussi des valeurs similaires (Voir en Annexes Figures 23 et 24 pour l'Australie et Figures 25 et 26 pour les États-Unis).

VI.2 Comparaison des moyennes des critères de l'ensemble des bassins :

Egalement, nous avons fait la comparaison des moyennes des critères de tous les bassins pour les deux modèles. Pour tous les pays on ne voit pas de différence entre les moyennes des critères de tous les bassins pour les deux modèles. Par rapport à fonctions objectives, on a aussi des valeurs similaires (Voir en Annexes Figure 27 pour l'Australie et Figure 28 pour les États-Unis).

Dans la Figure 11, dirigé plus précisément pour les hauts débits avec $NSE(Q)$, on voit des valeurs similaires des critères pour les deux modèles, même situation pour P1 et P2.

Critères NSE des bassins de la France

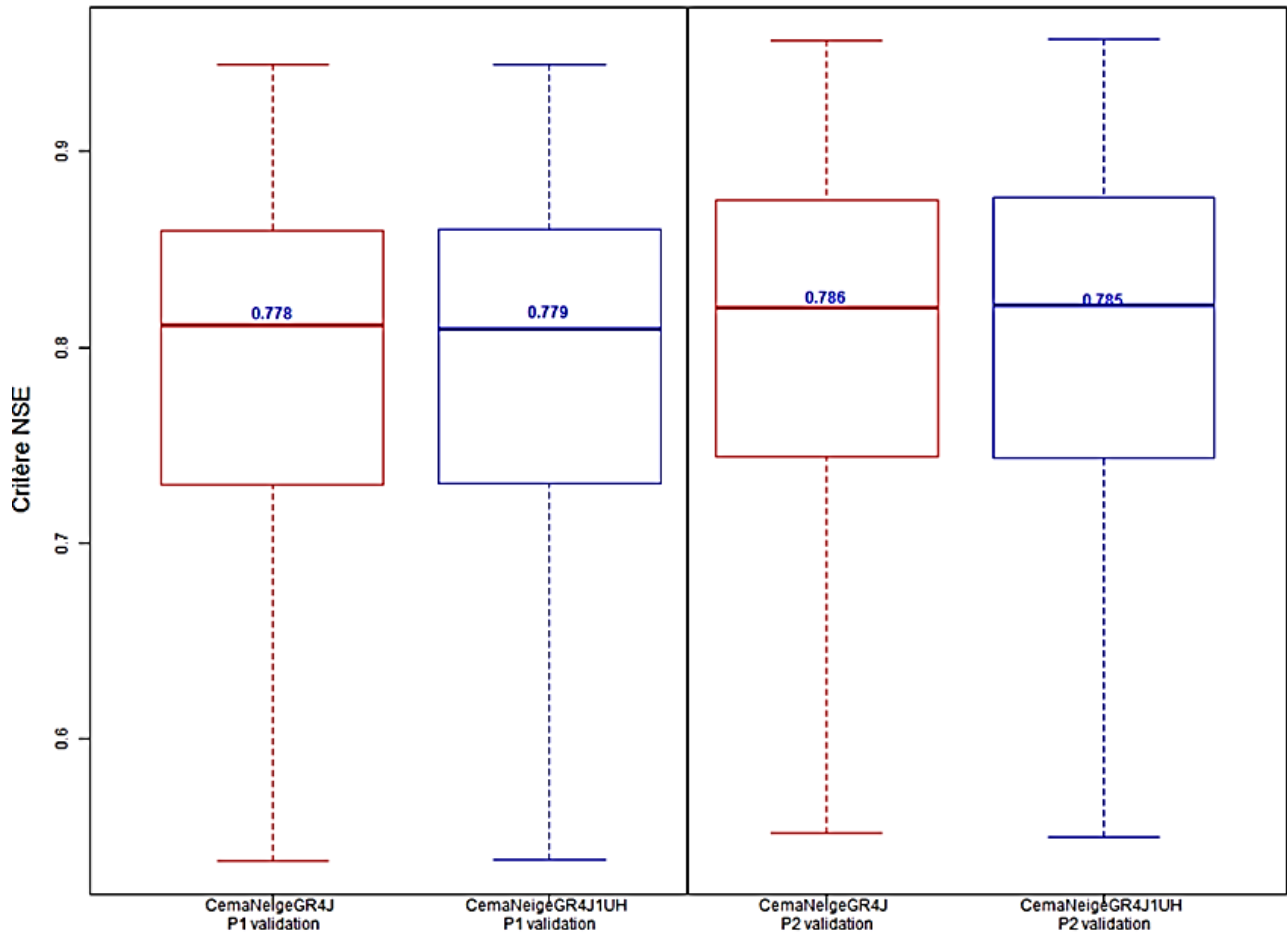


Figure 11 Analyse des moyennes des critères avec critère $NSE(Q)$ des bassins de la France.

VI.3 Différence entre critères :

Ensuite, nous avons analysé chaque bassin en comparant les valeurs des critères du modèle modifié à un hydrogramme unitaire (GR4J1UH) avec celui à 2 hydrogrammes unitaires (GR4J). Donc, un critère positif proche de 1 indique une meilleure performance avec le modèle à un hydrogramme unitaire, ainsi qu'un critère égal à 0 indique des valeurs similaires/égal pour les deux modèles, et un critère négatif indique une meilleure performance avec le modèle à deux hydrogrammes unitaires.

Pour tous les pays, nous avons observé de meilleures valeurs de critères pour le modèle modifié à un hydrogramme unitaire, cependant certains bassins présentent des critères plus faibles avec ce modèle (Voir en Annexes Figures 29 et 30 pour l'Australie et Figures 31 et 32 pour les États-Unis).

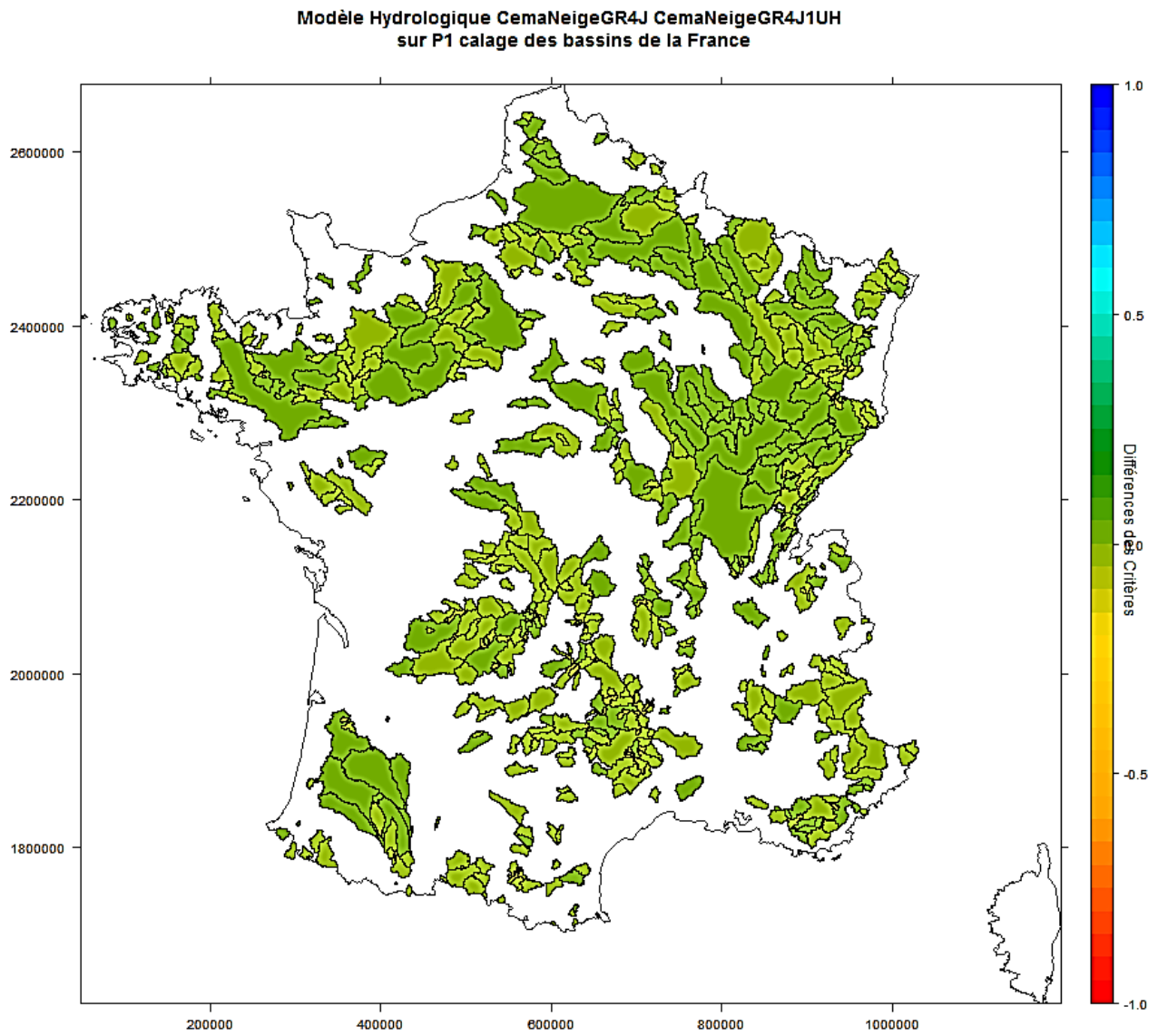


Figure 12 Différence des critères $NSE(Q)$ sur P1 calage des bassins de la France.

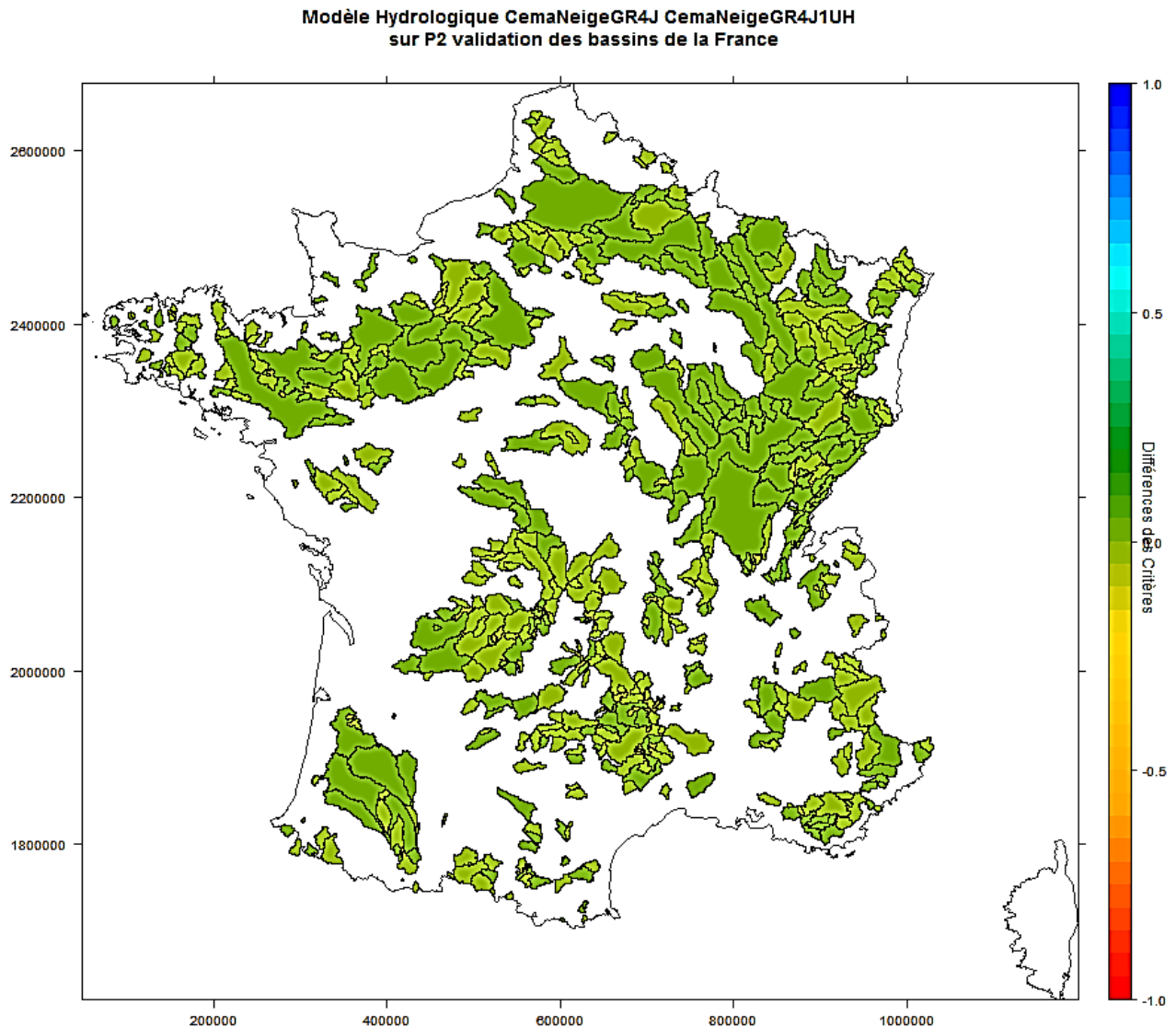


Figure 13 Différence des critères $NSE(Q)$ sur P2 validation des bassins de la France.

De les Figures 12 et 13, qui montrent la différence des critères NSE sur les débits non transformés, $NSE(Q)$, des bassins de la France pour les deux modèles, on constate tout d'abord une faible différence des critères. Et ensuite, la plupart des bassins présentent un meilleur critère avec le modèle à un hydrogramme unitaire. Cependant, certains bassins montrent une différence négative qu'indique un critère plus faible avec le modèle à un hydrogramme unitaire.

VI.4 Analyse des paramètres :

Afin d'analyser l'influence du changement du modèle à un hydrogramme unitaire, nous avons analysé les valeurs des paramètres par les deux modèles. Afin de faciliter l'interprétation, nous avons utilisé une codification de couleurs. Cela indique, avec des points de couleur noir pour les valeurs des abscisses égal aux valeurs des ordonnées, avec des points de couleur rouge pour les valeurs des abscisses inférieures aux valeurs des ordonnées, et avec des points de couleur verte pour les valeurs des abscisses supérieures aux valeurs des ordonnées.

Comme résultat, nous avons obtenu pour tous les pays des valeurs similaires pour X_1 , X_2 et X_3 . (Voir en Annexes Figure 33 pour l'Australie et Figure 34 pour les États-Unis).

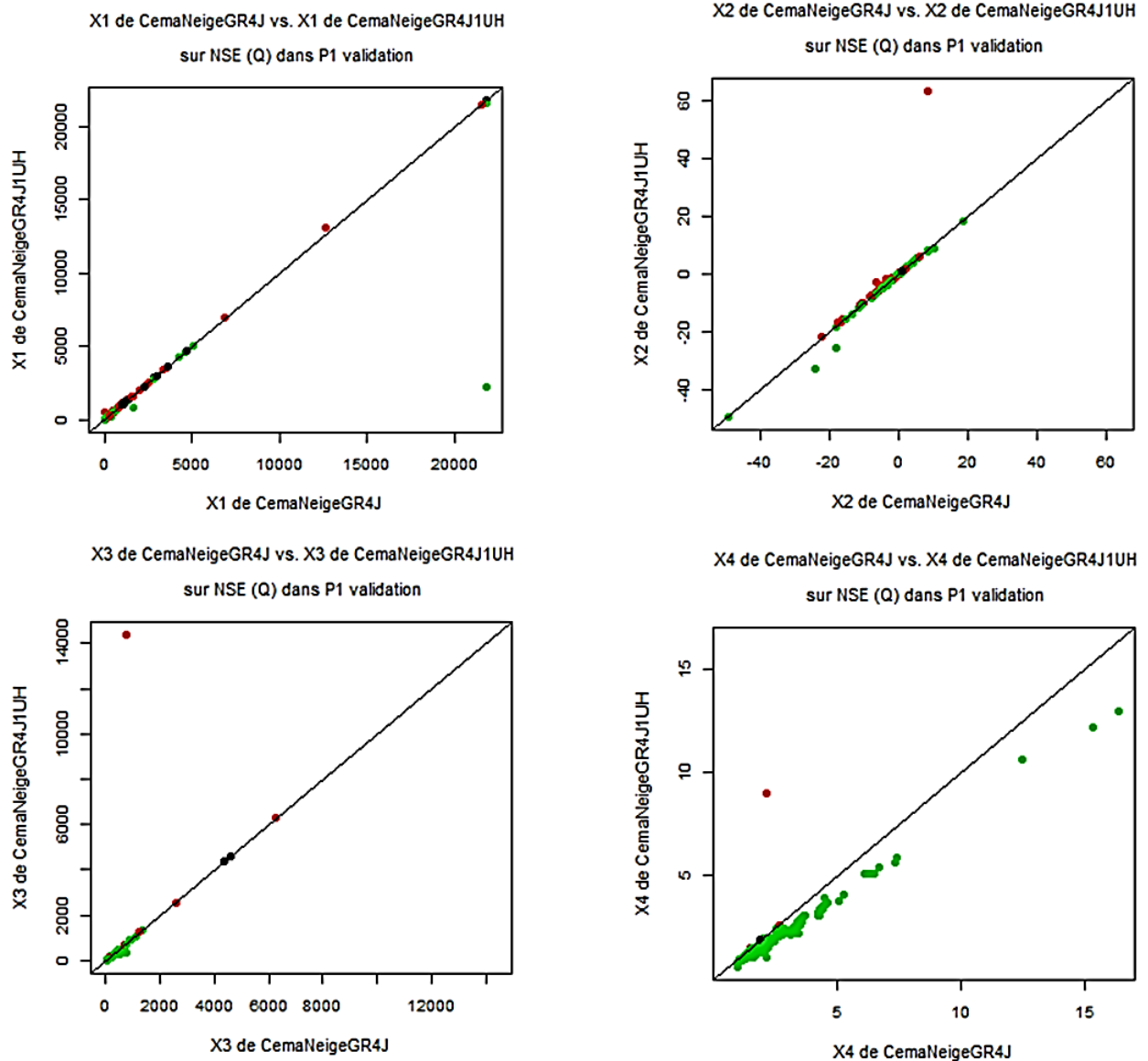


Figure 14 Analyse des paramètres avec critères $NSE(Q)$ des bassins de la France.

Sur la Figure 14, on voit des valeurs de paramètres similaires pour les paramètres X_1 , X_2 et X_3 et varient pour X_4 ; pour X_4 elles diffèrent davantage à cause du changement de structure du modèle.

VI.5 Analyse des percentiles d'erreur absolue :

Nous avons aussi analysé les percentiles d'erreur absolue sur les bas débits (Q_{05}), sur les débits moyens (Q_{50}), et sur les hauts débits (Q_{95}). En indiquant, avec des points de couleur noir pour les valeurs des abscisses égal aux valeurs des ordonnées, avec des points de couleur rouge pour les valeurs des abscisses inférieures aux valeurs des ordonnées, et avec des points de couleur verte pour les valeurs des abscisses supérieures aux valeurs des ordonnées.

Pour tous les pays, nous avons trouvé des valeurs similaires pour les deux modèles sur les bas débits, les débits moyens, et les hauts débits. Les figures suivantes montrent de valeurs similaires

pour la France. (Voir en Annexes Figures 35, 36 et 37 pour l'Australie et Figures 38, 39 et 40 pour les États-Unis).

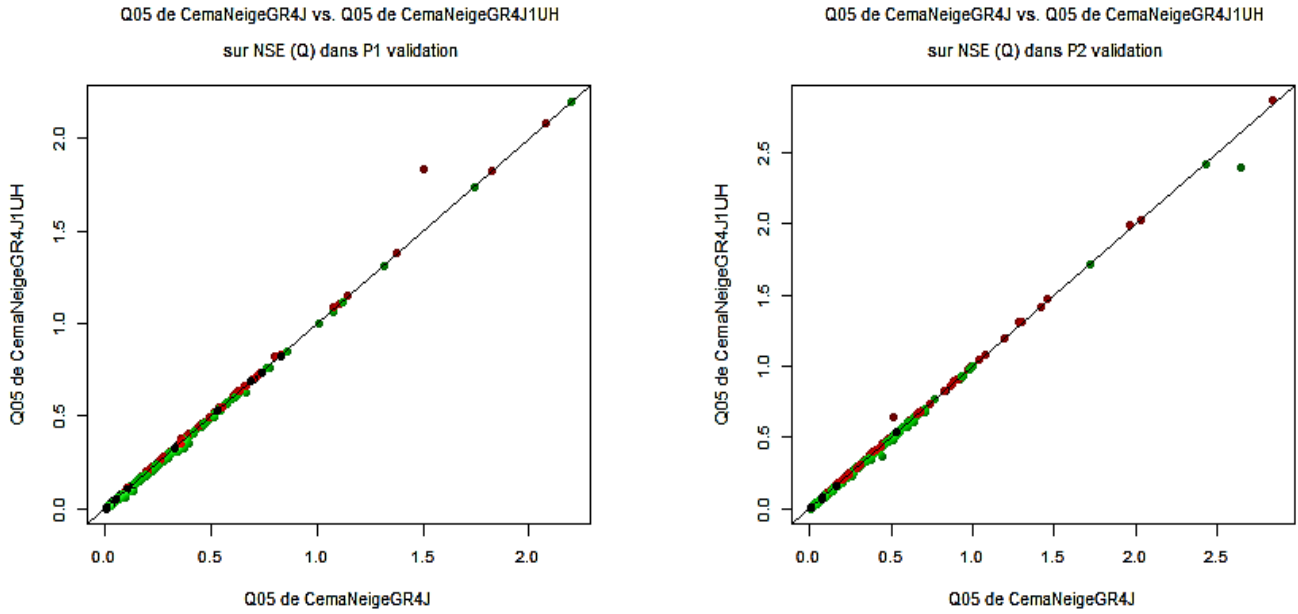


Figure 15 Analyse des bas débits (Q_{05}) avec critère $NSE(Q)$ des bassins de la France.

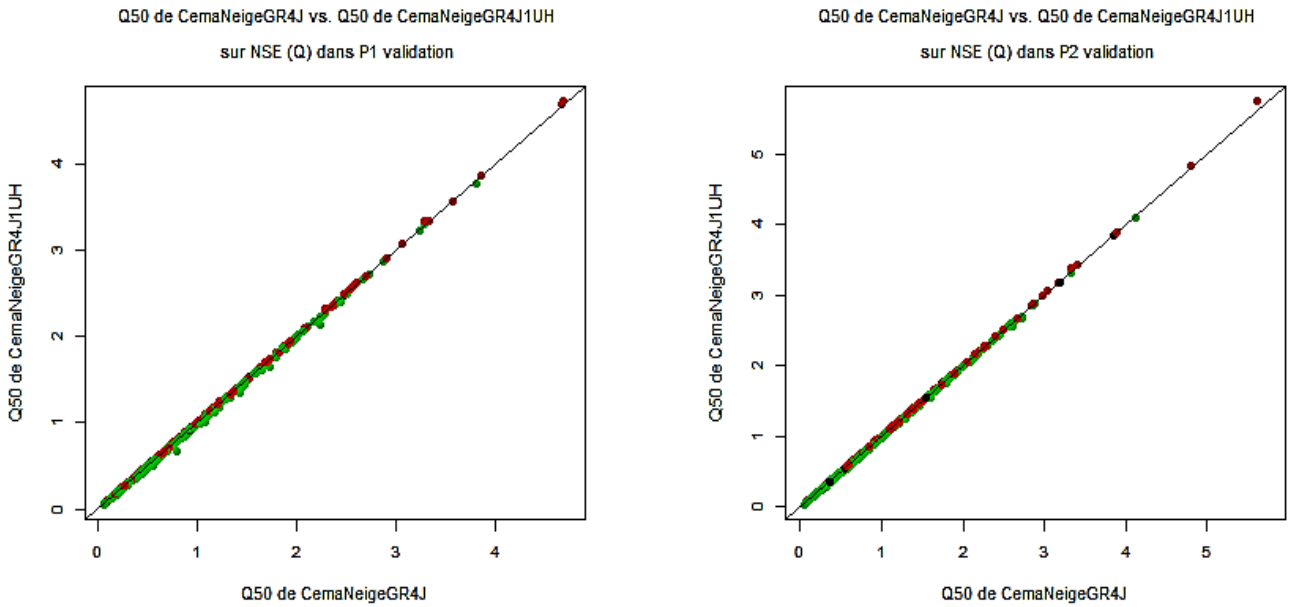


Figure 16 Analyse des débits moyens (Q_{50}) avec critère $NSE(Q)$ des bassins de la France.

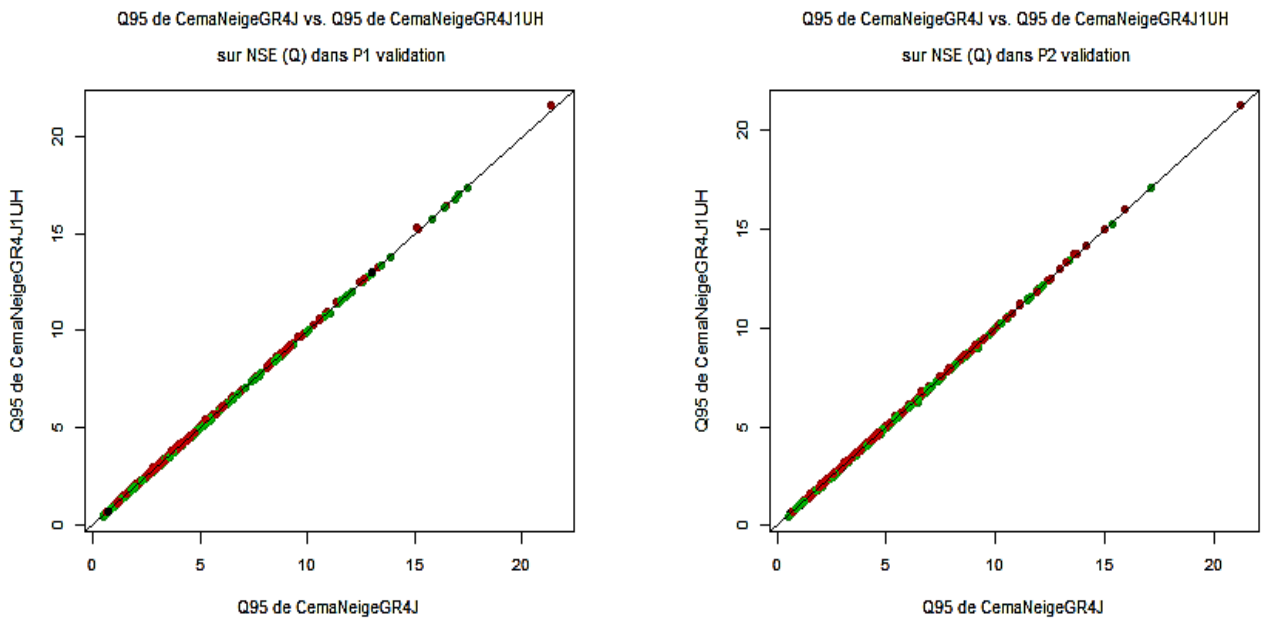


Figure 17 Analyse des hauts débits (Q_{95}) avec critère $NSE(Q)$ des bassins de la France.

VI.6 Analyse de coefficient de corrélation :

Nous avons analysé le coefficient de corrélation, travaillé avec chaque fonction objective, afin d'évaluer la justesse entre les modèles d'un et deux hydrogrammes unitaires. Pour tous les pays on ne voit pas de différence entre les coefficients de corrélation de chaque modèle. Par rapport aux fonctions objectifs, on remarque un meilleur score de qualité avec KGE, plus proche de 1 (Voir en Annexes Figure 41 pour l'Australie et Figure 42 pour les États-Unis).

Coefficient de corrélation des bassins de la France

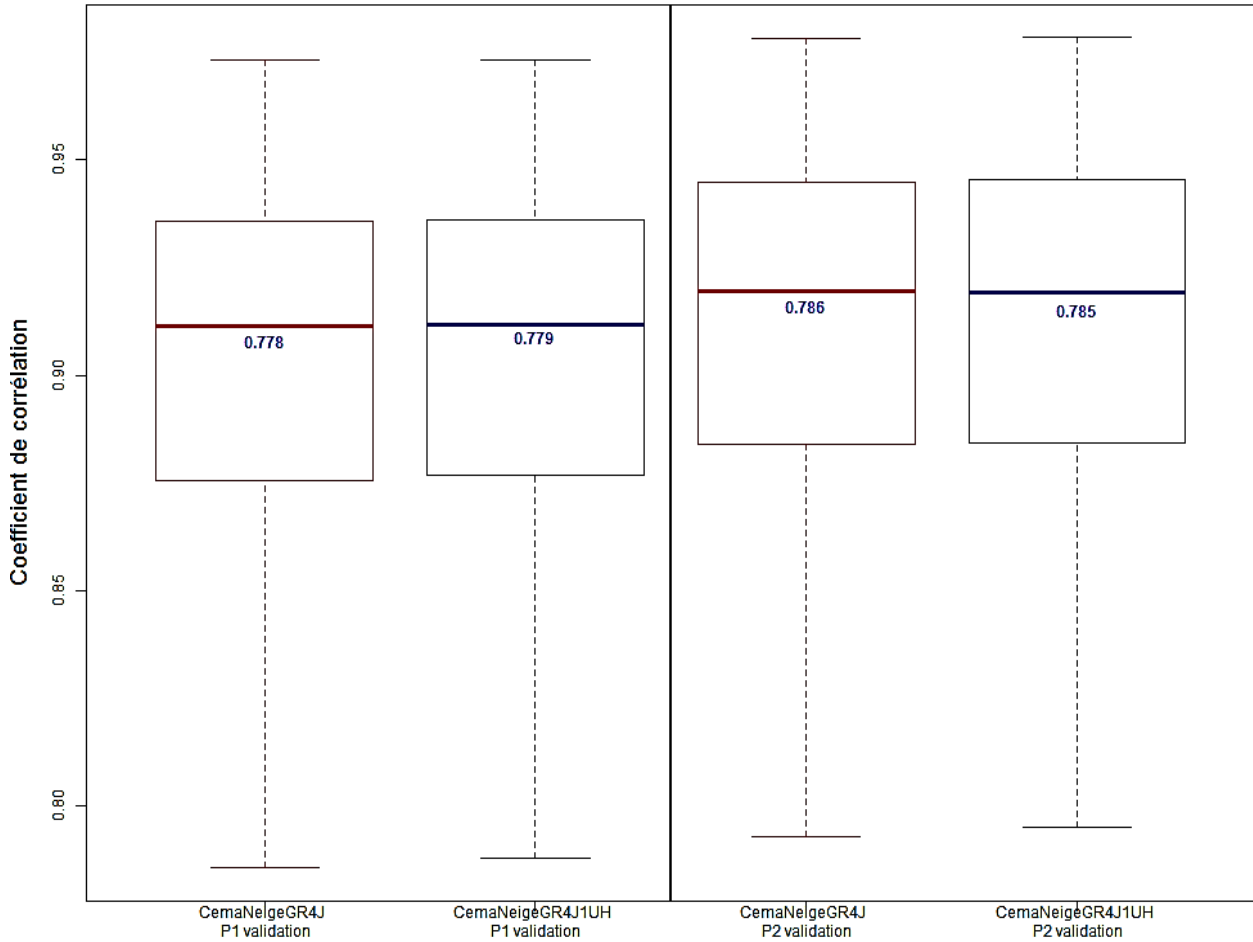


Figure 18 Analyse du coefficient de corrélation avec critère $NSE(Q)$ des bassins de la France.

Dans la Figure 21, dirigé plus précisément pour les hauts débits avec $NSE(Q)$, on voit des valeurs similaires des coefficients de corrélation pour les deux modèles, même situation pour P1 et P2.

De la même manière dans le Figure 22, qui est dirigé plus précisément pour les hauts débits avec KGE sur les débits non transformés, $KGE(Q)$, on constate qu'il n'y a pas de différence entre les coefficients de corrélation de chaque modèle, même situation pour les deux périodes d'étude (P1 et P2).

Grace à ces deux graphiques, on voit des scores plus proches de 1 avec le KGE , pour cela on peut déduire que KGE donne un meilleur score de qualité par rapport à NSE .

Coefficient de corrélation des bassins de la France

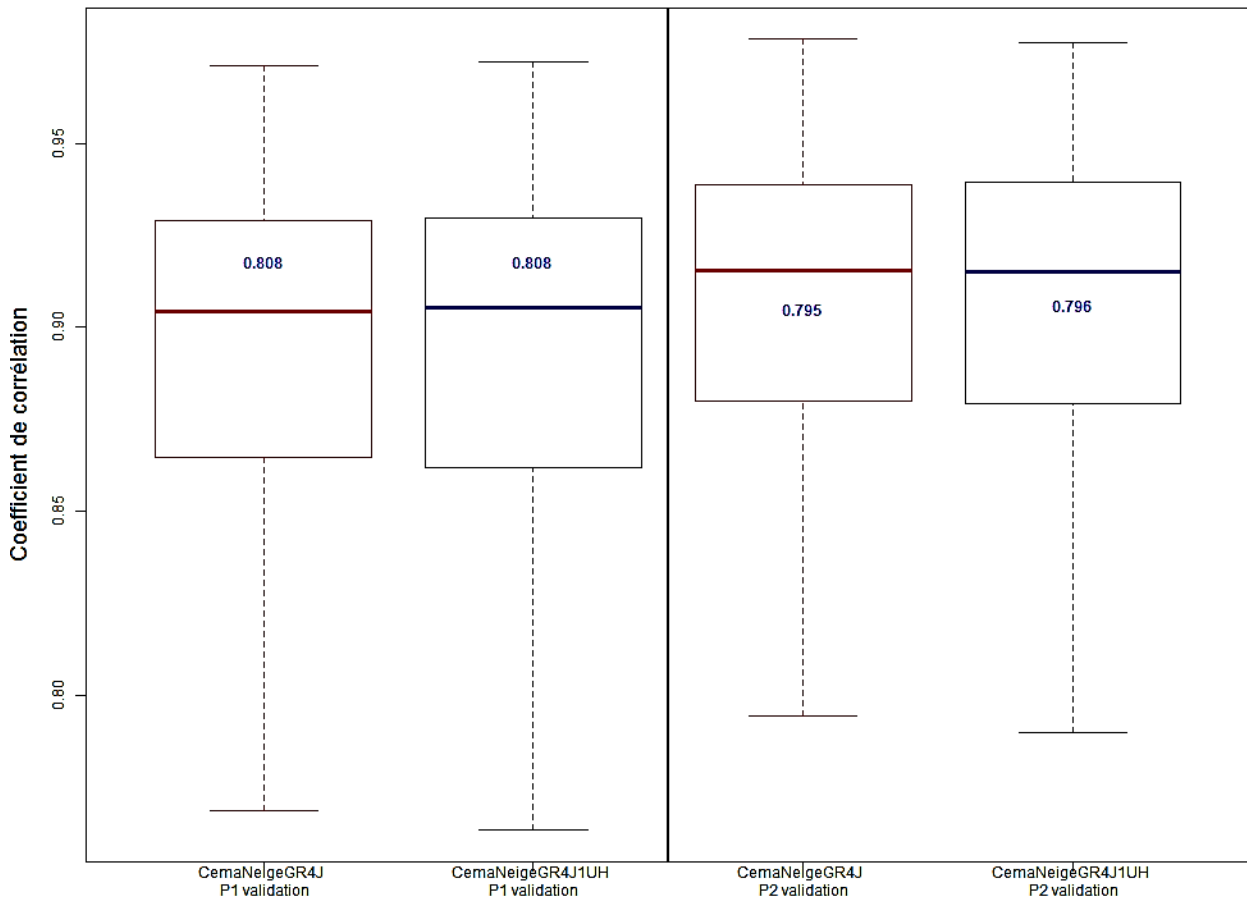


Figure 19 Analyse du coefficient de corrélation avec critère KGE sur les débits non transformés, $KGE(Q)$, des bassins de la France.

VI.7 Comparaison des performances :

Pour aller plus loin, nous avons comparé les performances pour les hauts débits, les débits moyennes, et les bas débits, initialement calibrés sur les hauts débits, débits moyennes, et bas débits, en utilisant les critères NSE et KGE. Cela afin de détecter l'influence des modèles sur les performances pour les hauts débits, les débits moyennes, et les bas débits.

Nous avons obtenu des valeurs similaires pour tous les pays, dans tous les cas. Voici les graphiques pour la France, qui montrent la comparaison des performances NSE et KGE avec calibration sur hauts débits, débits moyennes, et bas débits. Les graphiques montrent des valeurs similaires pour tous les cas en France (Voir en Annexes Figures 43, 44 et 45 pour l'Australie et Figures 46, 47 et 48 pour les États-Unis).

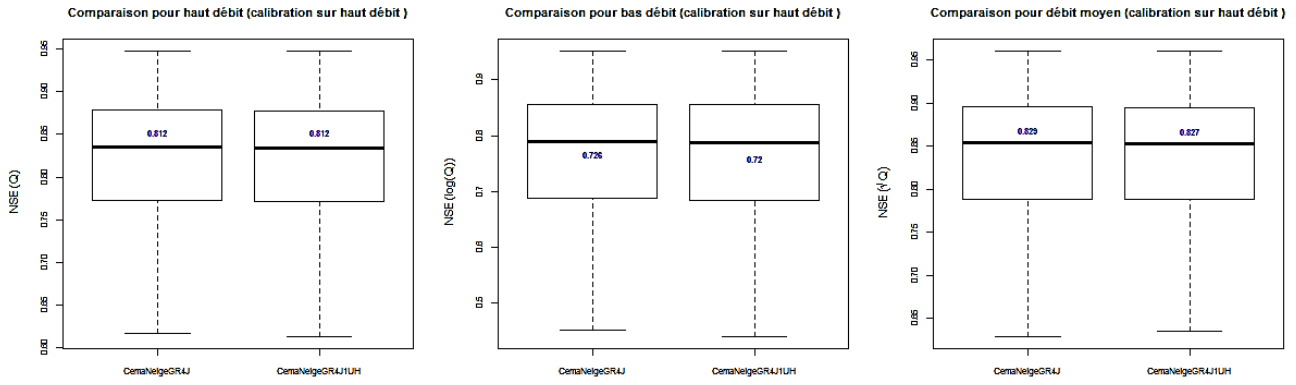


Figure 20 Comparaison des performances NSE avec calibration sur haut débit pour bassins de la France

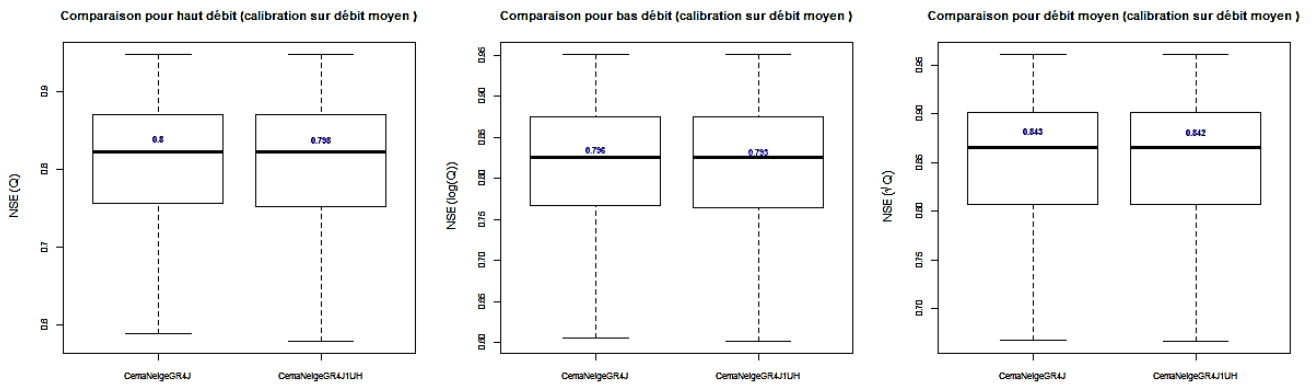


Figure 21 Comparaison des performances NSE avec calibration sur débit moyenne pour bassins de la France.

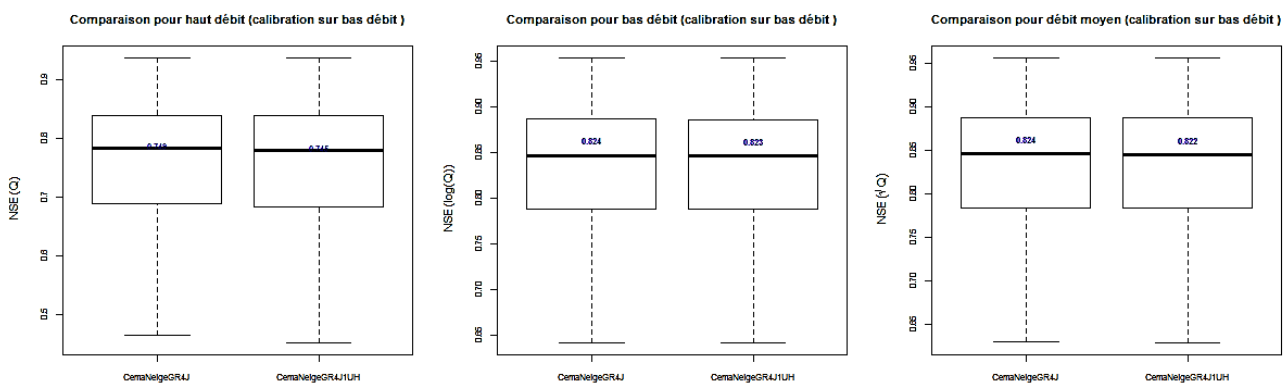


Figure 22 Comparaison des performances NSE avec calibration sur bas débit pour bassins de la France.

VII. Conclusions et perspectives :

Nous avons obtenu une faible différence entre les moyennes des critères de tous les bassins par les deux modèles. En général, pour tous les pays on a des valeurs similaires des critères par les deux modèles. Par rapport à fonctions objectives, on a aussi des valeurs similaires.

Suite l'analyse de chaque bassin, nous avons observé des meilleures valeurs de critères pour GR4J1UH sur les bassins aux États-Unis. Cependant, certains bassins présentent un critère plus faible avec GR41UH. Même situation pour KGE et NSE. Cela est lié à la surface et les caractéristiques géologiques des bassins. Les bassins avec une surface plus petite présentent des critères plus faibles avec le modèle à un hydrogramme unitaire, également pour les bassins qui présentent des systèmes aquifères peu perméables.

Grace à l'analyse des percentiles d'erreurs absolues, nous avons trouvé, pour tous les pays, des valeurs similaires pour les deux modèles sur les bas débits, débits moyens, et hauts débits. Même situation pour KGE et NSE.

Nous avons analysé aussi la différence entre les coefficients de corrélation de chaque modèle et nous avons trouvé, pour tous les pays, des valeurs similaires pour les deux modèles. Par rapport aux fonctions objectifs, on remarque un meilleur score de qualité avec KGE (plus proche de 1).

Nous nous sommes également intéressé aux valeurs des paramètres avant et après modification : elles sont similaires pour les paramètres X_1 , X_2 et X_3 et varient pour X_4 (avec ou sans CemaNeige) ; pour X_4 elles diffèrent davantage. Ces derniers résultats sont cohérents avec la modification portée à la structure du modèle (X_4 étant le temps de base de l'hydrogramme unitaire). Même situation pour KGE et NSE.

Afin de détecter l'influence des modèles sur les performances pour les hauts débits, les débits moyens, et les bas débits, nous avons comparé les performances pour les hauts débits, les débits moyens, et les bas débits, initialement calibrés sur les hauts débits, les débits moyennes, et les bas débits, en utilisant les critères NSE et KGE. Nous avons obtenu des valeurs similaires pour tous les pays, dans tous les cas.

Au vu de tous les résultats nous considérons important appliquer le même changement de structure au modèle GR6J et d'effectuer le même travail de comparaison.

VIII. Références bibliographiques :

- Catalogne, C. (2012). Amélioration des méthodes de prédétermination des débits de référence d'étiage en sites peu ou pas jaugés. Université Joseph Fourier, Grenoble, 285 p.
- Coron, L., (2013). Les modèles hydrologiques conceptuels sont-ils robustes face à un climat en évolution ? Thèse de doctorat, IRSTEA (Antony), AgroParisTech (Paris), 364 pp.
- Coron, L., Andréassian, V., Perrin, C., Lerat, J., Vaze, J., Bourqui, M., Hendrickx, F. (2012). Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments. *Water Resources Research* 48:1-17. DOI: 10.1029/2011wr011721.
- Coron, L., Perrin, C. and Michel, C. (2017a). airGR: Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling. R package version 1.0.5.12. <https://webgr.irstea.fr/airGR/?lang=en>.
- Coron, L., Thirel, G., Delaigue, O., Perrin, C. and Andréassian, V. (2017b). A Suite of Lumped GR Hydrological Models in an R Package. *Environmental Modelling and Software*, 94, 166–171. DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.05.002.
- Durand Y., Brun E., Mérindol L., Guyomarc'h G., Lesaffre B., Martin E. (1993). A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Annals of glaciology* 18:65-71.
- Durand Y., Giraud G., Brun E., Mérindol L., Martin E. (1999). A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting. *Journal of Glaciology* 45:469-484.
- Fortin, V. and Turcotte, R. (2006). Le modèle hydrologique MOHYSE. Département des Sciences de la Terre et de l'Atmosphère, Université du Québec à Montréal, 23 Juin.
- Gosset, C. (2014). Quel apport les données satellites d'enneigement pour le calage d'un modèle hydrologique sur des bassins de montagnes. Mémoire de fin d'études, Univ. Orsay Paris Sud, IRSTEA, Antony, 63 pp.
- Hingray, B., Picouet, C. et Musy, A. (2009a). Processus et modélisation hydrologique en milieu alpin. In *Hydrologie : Tome 2, Une science pour l'ingénieur*, page 70. PPUR presses polytechniques.
- Kampf, S. K. and S. J. Burges (2007). "A framework for classifying and comparing distributed hillslope and catchment hydrologic models." *Water Resources Research* 43(5).
- Klemeš V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal* 31:13-24. DOI: 10.1080/02626668609491024.
- Leavesley GH, Stannard LG. (1995). The precipitation-runoff modelling system—PRMS. In *Computer Models of Watershed Hydrology*, Singh VP (ed.). Water Resources Publications: Highlands Ranch, CO; 281–310.
- Le Moine, N. (2008). Le bassin versant de surface vu par le souterrain : une voie d'amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit? Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie.

- Mathevet, T. (2005). Quels modèles pluie-débit globaux pour le pas de temps horaire ? Développement empirique et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris), Cemagref (Antony), France, 463 pp.
- Michel, C. (1983). Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre? *La Houille Blanche*(1), 39-44.
- Nash J.E., Sutcliffe J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10:282-290.
- Nicolle, P., (2010). Prise en compte de la neige dans la prévision hydrologique : quel apport pour mieux prévoir les crues nivales ? Mémoire de Master, UPMC, Cemagref, Antony, 53 pp.
- Ouarda T.B., Ashkar F. (1998). Effect of trimming on LP III flood quantile estimates. *Journal of Hydrologic Engineering* 3:33-42.
- Oudin L., Andréassian V., Mathevet T., Perrin C., Michel C. (2006). Dynamic averaging of rainfall-runoff model simulations from complementary model parameterizations. *Water Resources Research* 42:n/a-n/a. DOI: 10.1029/2005wr004636.
- 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.
- Perrin C. (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative, Thèse de doctorat, *soutenue le 20 octobre 2000*, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Perrin C., Michel C., Andréassian V. (2001). Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology* 242:275-301.
- Perrin C., Michel C., Andréassian V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 279:275-289. DOI: 10.1016/s0022-1694(03)00225-7.
- Perrin C., Michel C., Andréassian V. (2009). A set of hydrological models (Chapter 16). *Environmental Hydraulics*. J. M. Tanguy. Paris, ISTE Ltd, John Wiley & Sons. Volume 2 *Mathematical models*: 493-509.
- Ponce V. M., (1989). *Engineering Hydrology: Principles and practices*, Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Quintana-Segui P., Le Moigne P., Durand Y., Martin E., Habets F., Baillon M., Canellas C., Franchisteguy L., Morel S. (2008). Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47:92-106. DOI: 10.1175/2007JAMC1636.1.
- Sandre, C. d. a. (2002). *Référenciel hydrographique*. M. c. d. l'Environnement: p. 49.

- Singh V. P., (1995). *Watershed Modeling*. In *computer Models of Watershed Hydrology*, Colorado: Water Resources Publication.
- Sittner W.T. (1976). Wmo Project on Intercomparison of Conceptual Models Used in Hydrological Forecasting. *Hydrological Sciences Bulletin* 21:203-213. DOI: 10.1080/02626667609491617.
- Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K., Tignor M., Miller H.L. (2007). IPCC, *Climate change 2007: the physical science basis*. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Terrier, M., 2016. *Evaluation des procédures de naturalisation pour la reconstitution de débits sur le bassin versant de la Seine*. Rapport de stage de Master 2 Polytech'Nice Sophia, IRSTEA, Antony, 73 pp.
- Thirel G., Martin E., Mahfouf J.F., Massart S., Ricci S., Habets F. (2010). A past discharges assimilation system for ensemble streamflow forecasts over France – Part 1: Description and validation of the assimilation system. *Hydrology and Earth System Sciences* 14:1623-1637. DOI: 10.5194/hess-14-1623-2010.
- Turcotte, R., Fortin, L., Fortin, V., Fortin, J.-P. & Villeneuve, J.-P. (2007). Operational analysis of the spatial distribution and the temporal evolution of the snowpack water equivalent in southern Québec, Canada. *Nord. Hydrol.* 38(3), 211–234.
- Valéry, A., (2010). *Modélisation précipitations – débit sous influence nivale. Élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants*. Thèse de Doctorat, Cemagref (Antony), AgroParisTech (Paris), 405 pp.
- Vaze, J., Chiew, F. H. S., Perraud, J., Viney, N. R., Post, D. A., Teng, J., Wang, B., Lerat, J. & Goswami, M. (2011). Rainfall- runoff modeling across southeast Australia: datasets, models and results. *Aust J. Water Resour.* 14(2).
- Vaze, J., Post, D.A., Chiew, F.H.S., Perraud, J.M., Viney, N.R., Teng, J. (2010). Climate non-stationarity – Validity of calibrated rainfall–runoff models for use in climate change studies. *Journal of Hydrology* 394:447-457. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.09.018.
- Vidal, J.P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., Soubeyroux, J.M. (2009). A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology* 30:1627-1644.
- Xu C. Y. et Singh V. P., (2004). Review on regional water resources assessment models under stationary and changing climate. *Water Resources Management*, vol. 18, n.° 6, pp. 591-612.
- Wagener, T., Hogue, T., Schaake, J., Duan, Q., Gupta, H., Andreassian, V., ... & Leavesley, G. (2006). The Model Parameter Estimation Experiment (MOPEX): Its structure, connection to other international initiatives and future directions. IAHS publication, 307, 339.

Annexes

Fonctions du package airGR :

Les fonctions du package air GR sont décrit à continuation en suivant cinq étapes pour son utilisation :

1. Se référer à l'aide pour RunModel_GR4H puis exécutez l'exemple fourni pour évaluer comment faire une simulation.
2. Se référer à l'aide pour CreateInputsModel pour comprendre comment les entrées d'un modèle sont préparées / organisées.
3. Reportez-vous à l'aide de CreateRunOptions pour comprendre comment les options d'exécution d'un modèle sont paramétrées / organisées.
4. Se référer à l'aide pour ErrorCrit_NSE et CreateInputsCrit pour comprendre comment le calcul d'un critère d'erreur est préparé / fait.
5. Reportez-vous à l'aide pour Calibration_Michel, exécutez l'exemple fourni, puis consultez l'aide pour CreateCalibOptions pour comprendre comment un étalonnage du modèle est préparé / fait.

Comparaison des critères pour bassins en Australie :

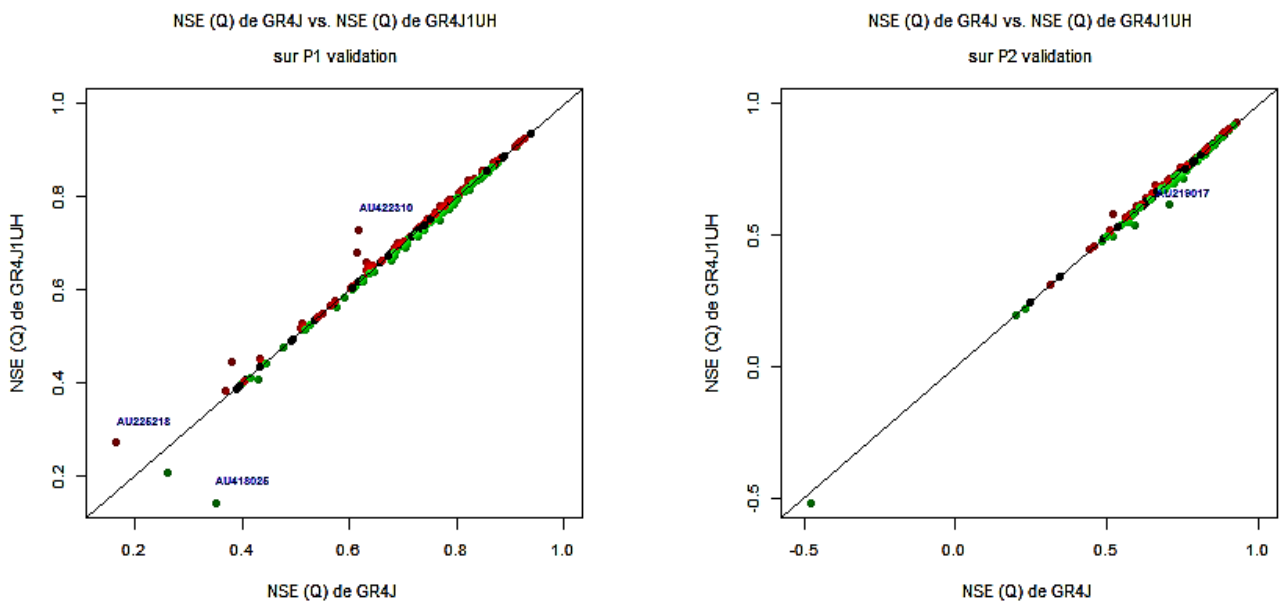


Figure 23 Analyse des critères NSE(Q) des bassins en Australie.

Comparaison des moyennes des critères de l'ensemble des bassins en Australie :

Critères NSE des bassins de l'Australie

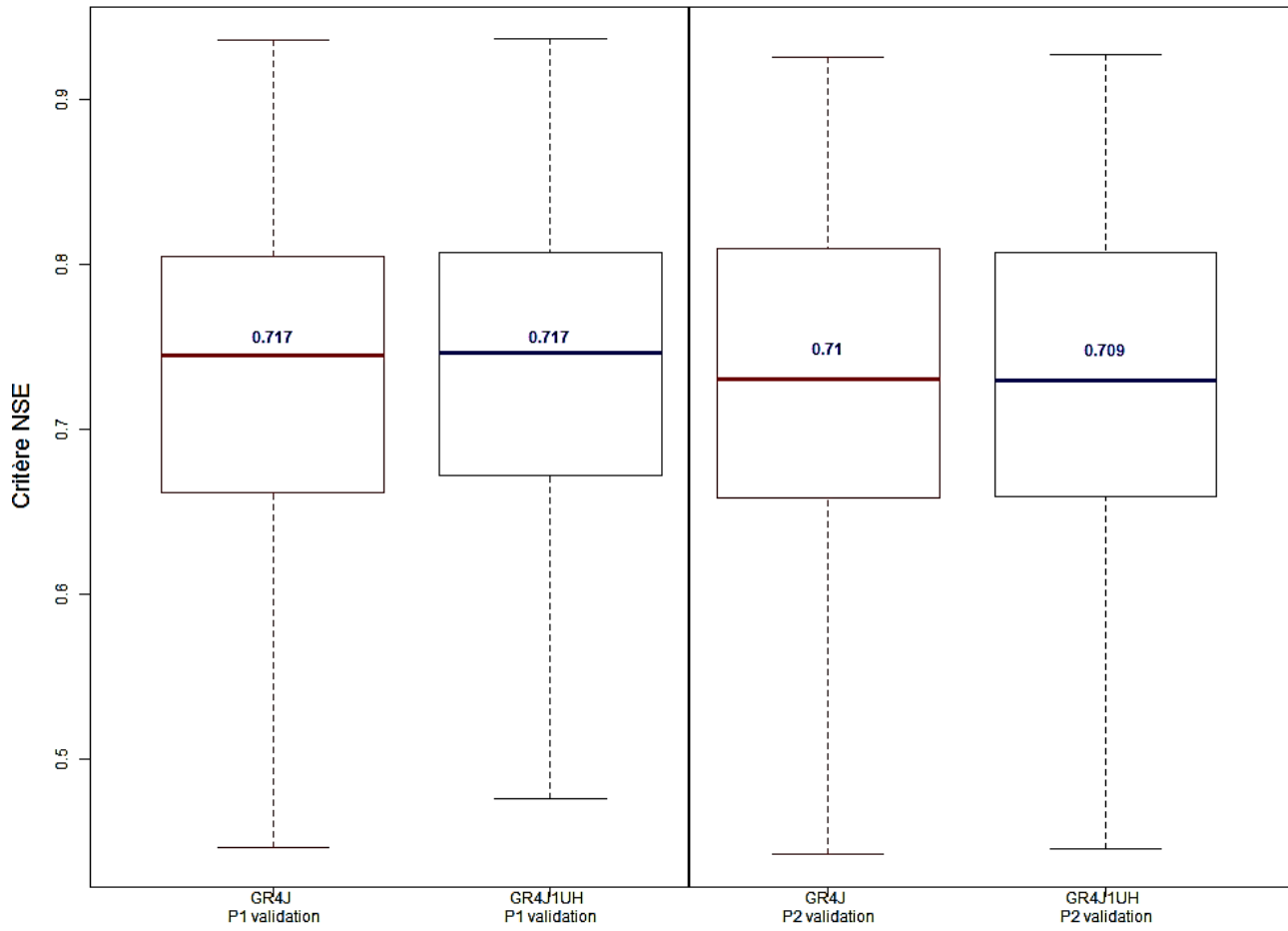


Figure 27 Analyse des moyennes des critères avec critère $NSE(Q)$ des bassins en Australie.

Comparaison des moyennes des critères de l'ensemble des bassins aux États-Unis :

Critères NSE des bassins des Etats-Unis

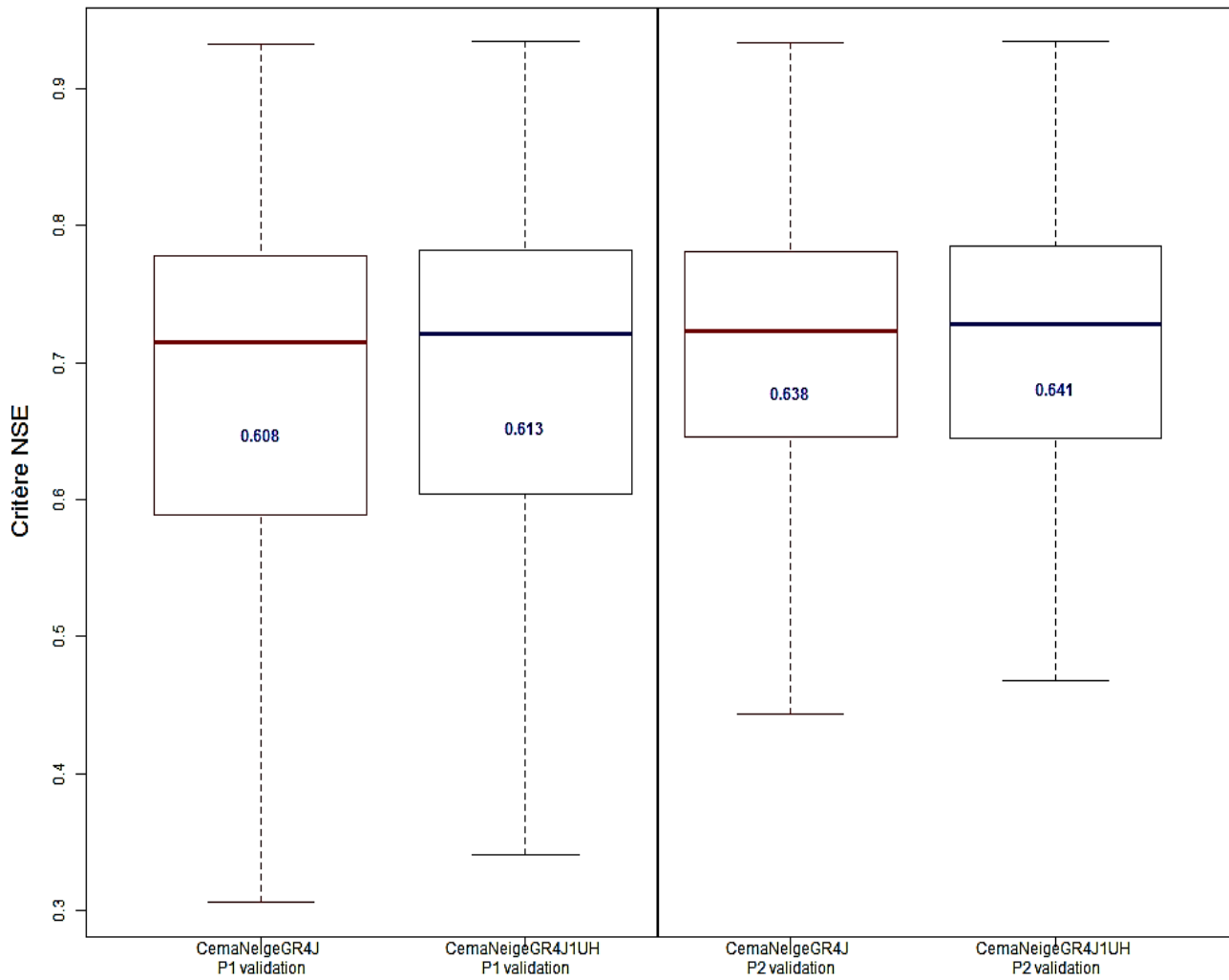


Figure 28 Analyse des moyennes des critères avec critère $NSE(Q)$ des bassins aux États-Unis.

Différence entre critères pour des bassins en Australie :

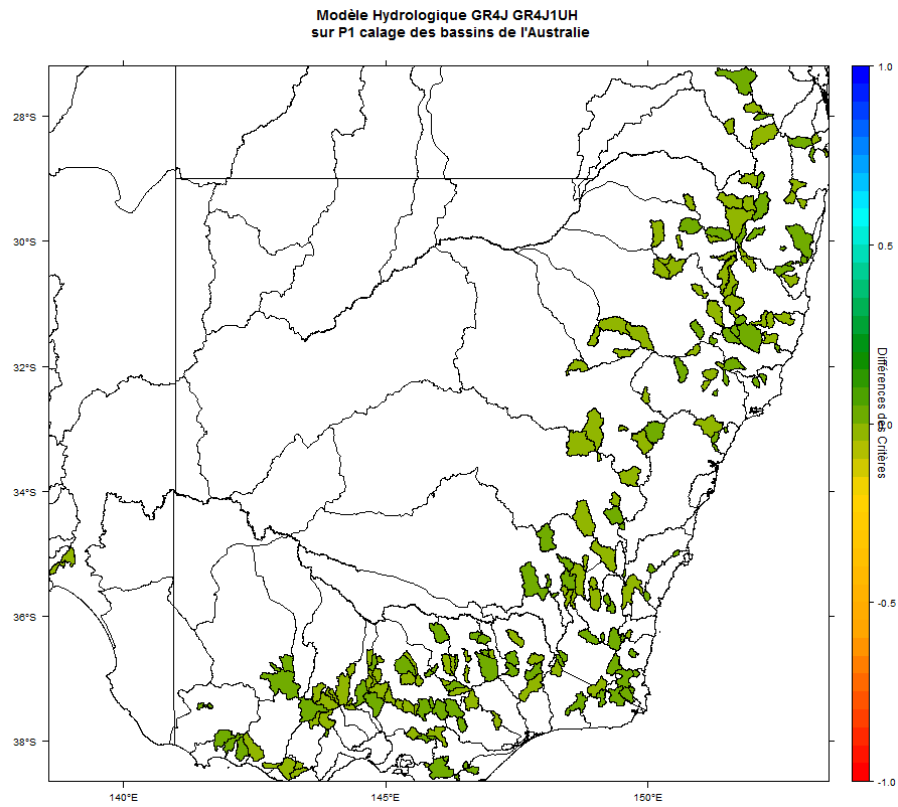


Figure 29 Différence des critères $NSE(Q)$ sur P1 calage des bassins en Australie.

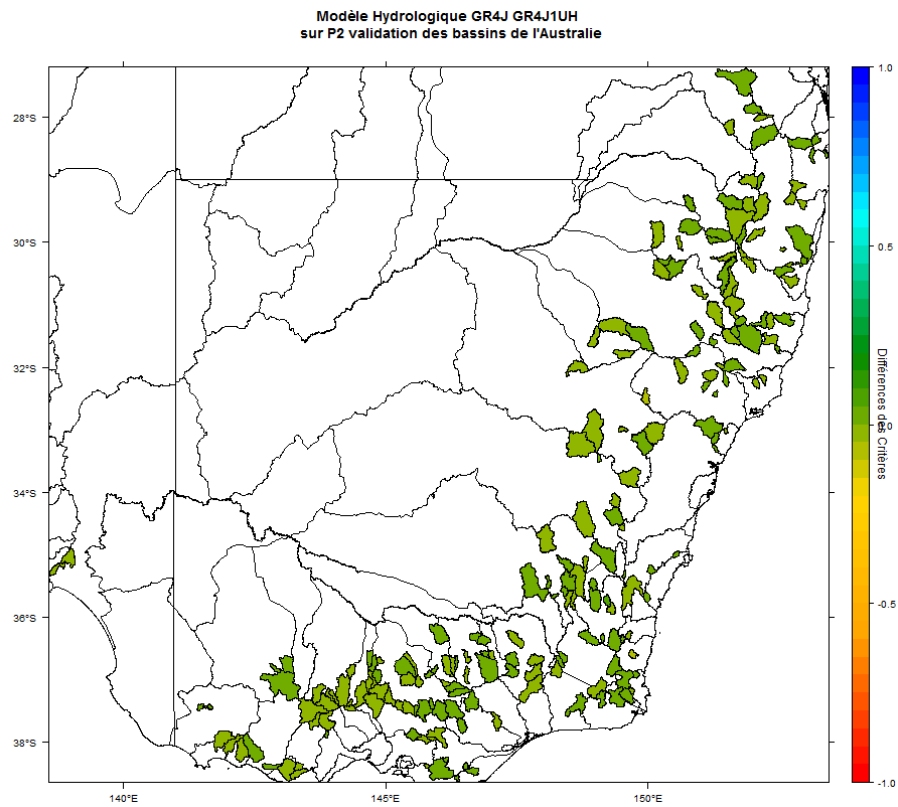


Figure 30 Différence des critères $NSE(Q)$ sur P2 validation des bassins en Australie.

Différence entre critères pour des bassins aux États-Unis :

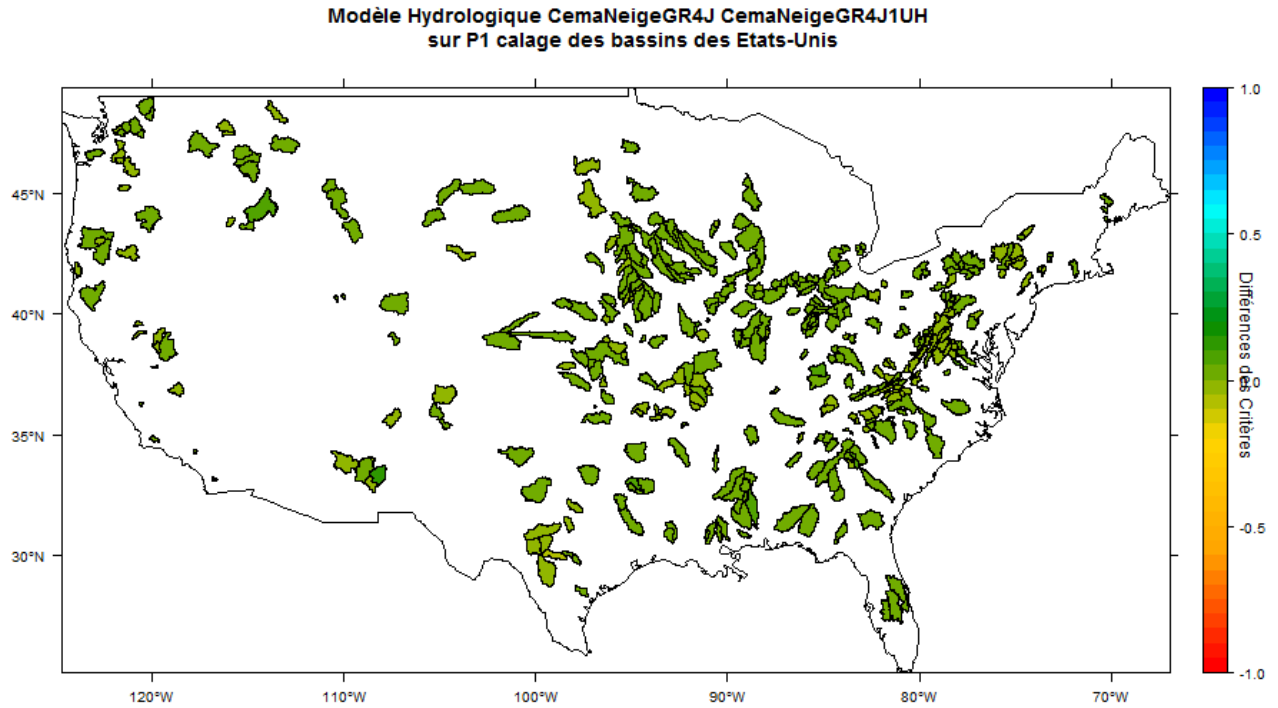


Figure 31 Différence des critères $NSE(Q)$ sur P1 calage des bassins aux États-Unis.

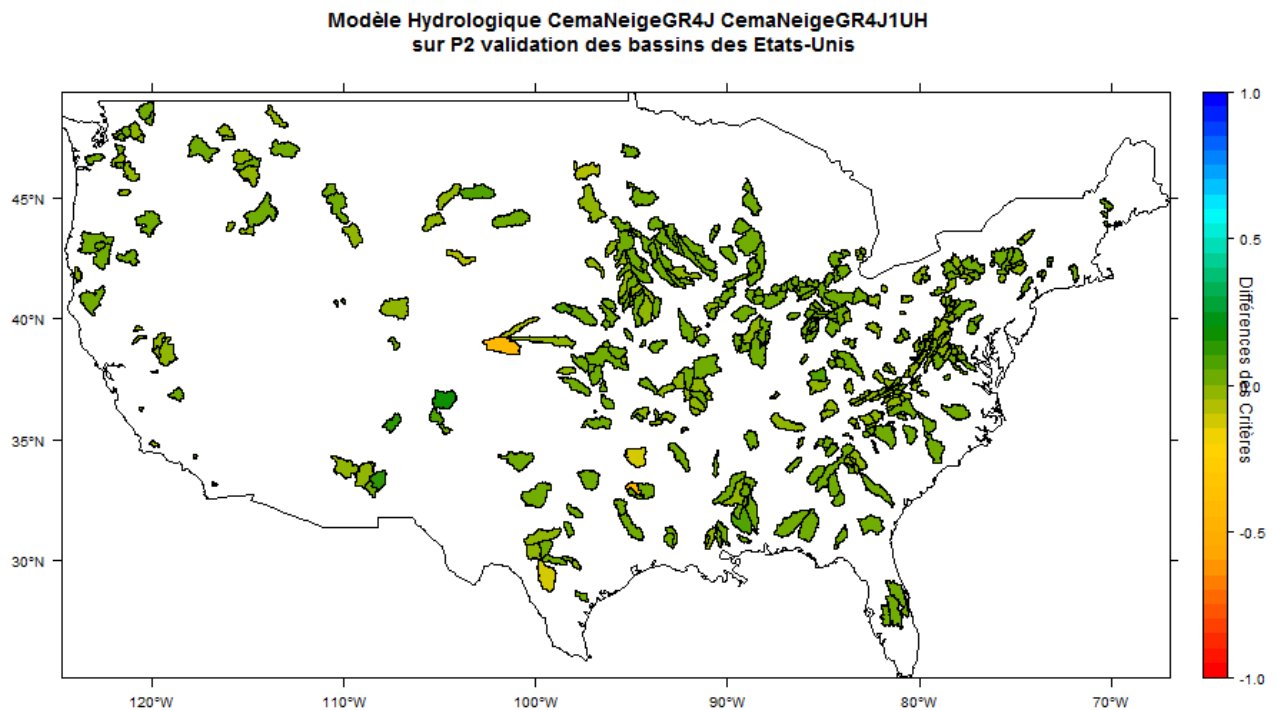


Figure 32 Différence des critères $NSE(Q)$ sur P2 validation des bassins aux États-Unis.

Analyse des paramètres pour des bassins en Australie :

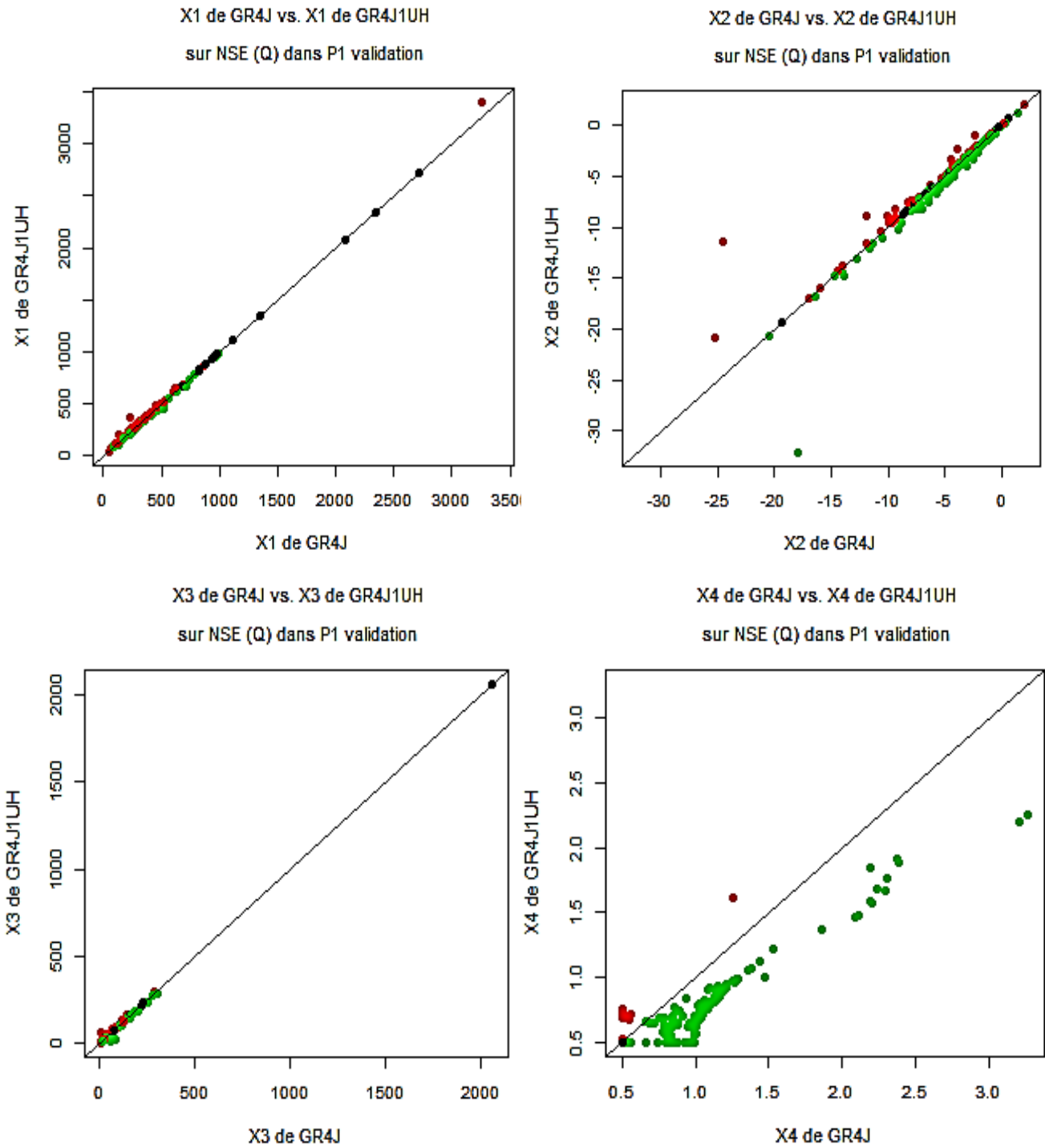


Figure 33 Analyse des paramètres avec critères NSE(Q) des bassins en Australie.

Analyse des paramètres pour des bassins aux États-Unis :

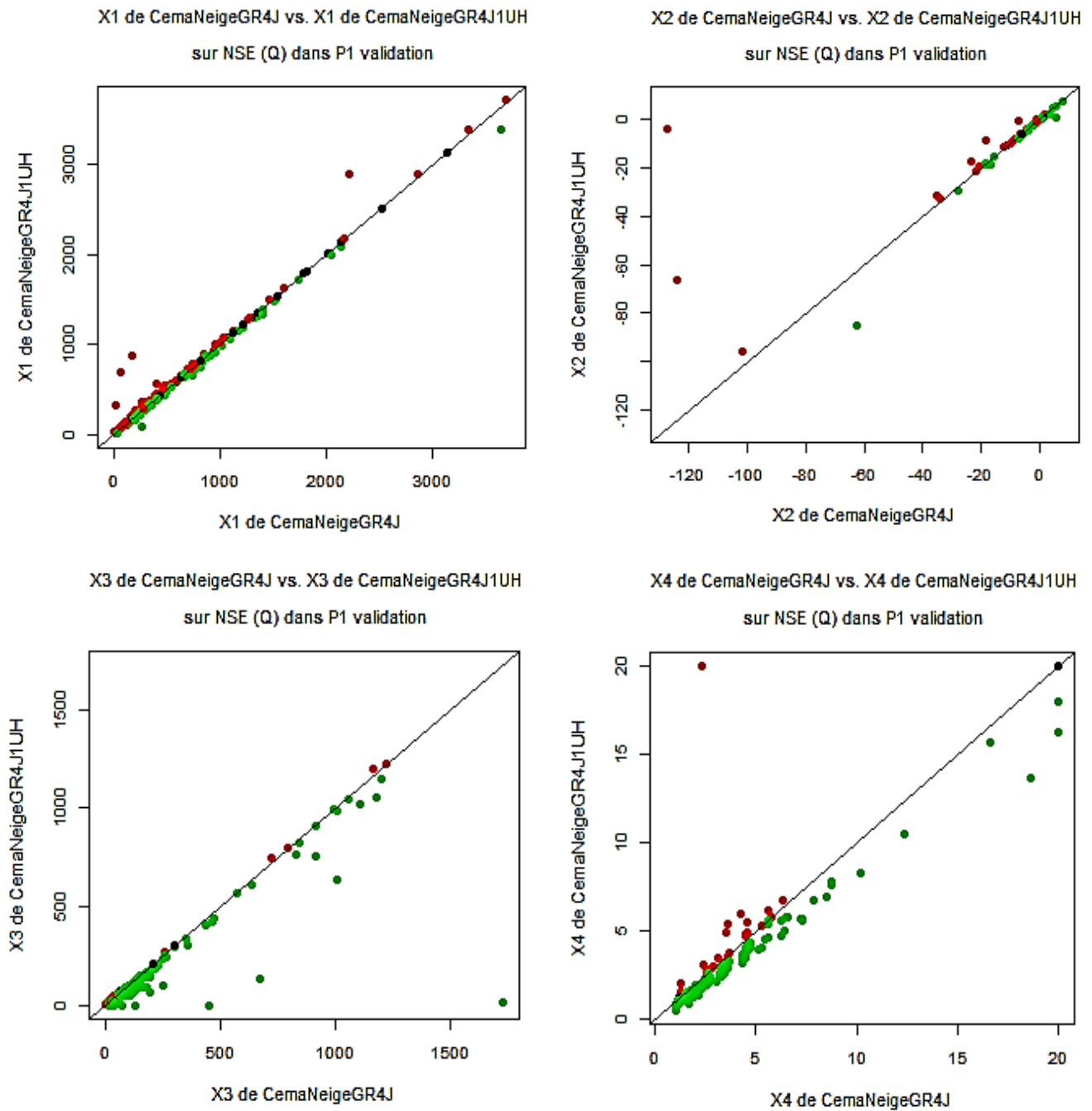


Figure 34 Analyse des paramètres avec critères NSE(Q) des bassins aux États-Unis.

Analyse des percentiles d'erreur absolue pour des bassins en Australie :

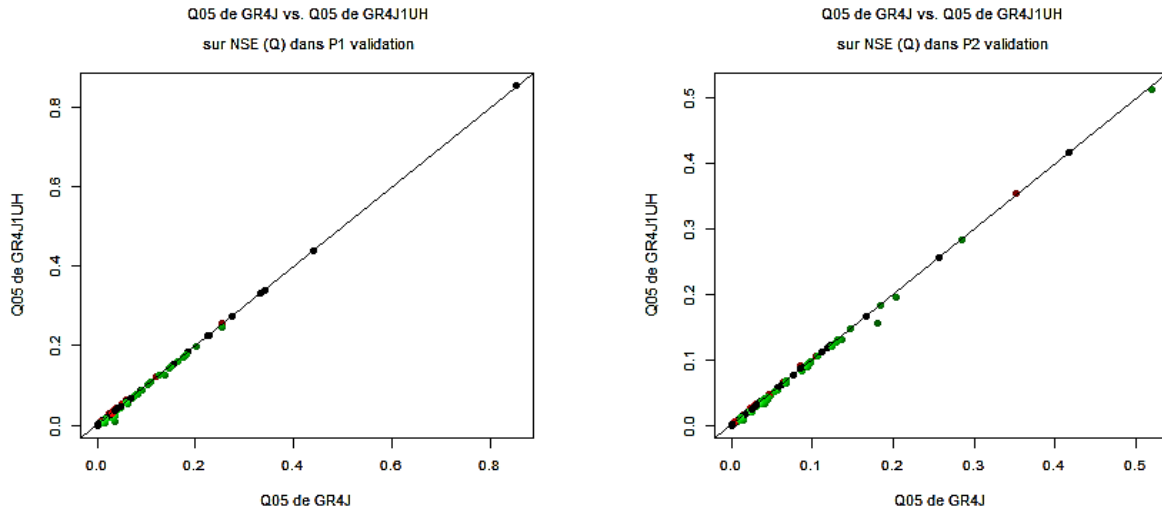


Figure 35 Analyse des bas débits (Q_{05}) avec critère $NSE(Q)$ des bassins en Australie.

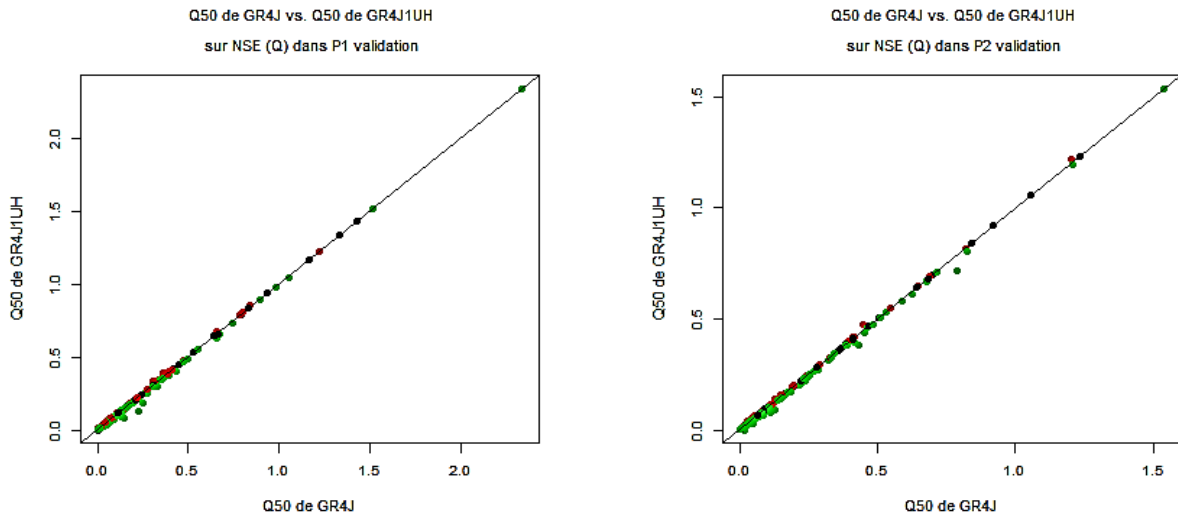


Figure 36 Analyse des débits moyens (Q_{50}) avec critère $NSE(Q)$ des bassins en Australie.

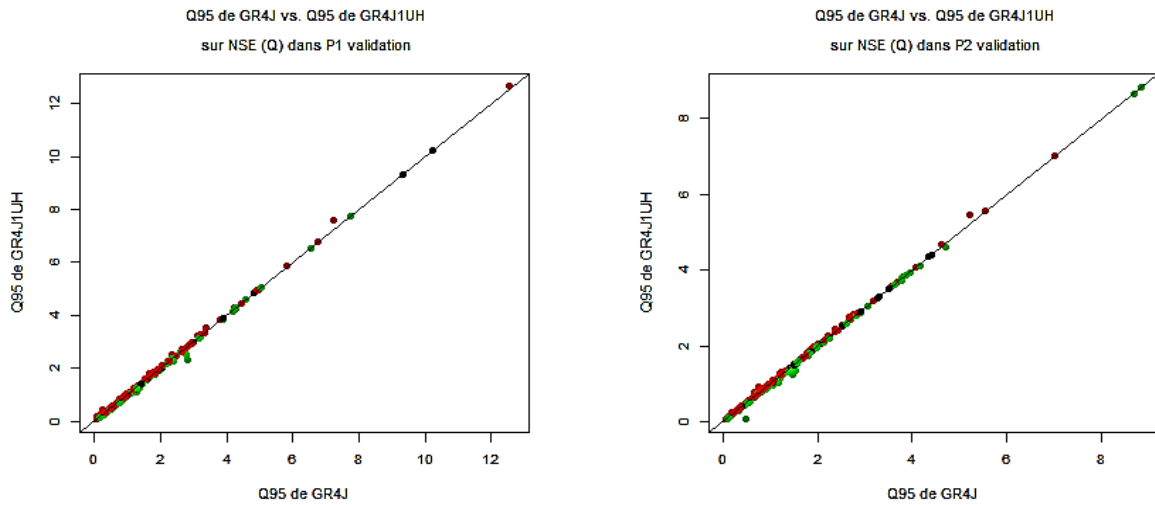


Figure 37 Analyse des hauts débits (Q_{95}) avec critère $NSE(Q)$ des bassins en Australie.

Analyse des percentiles d'erreur absolue pour des bassins aux États-Unis :

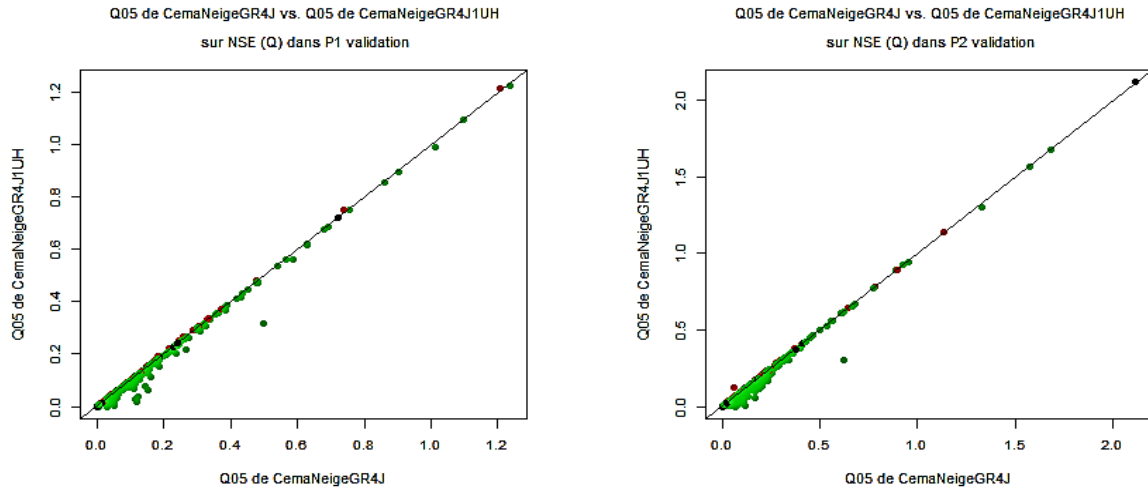


Figure 38 Analyse des bas débits (Q_{05}) avec critère $NSE(Q)$ des bassins aux États-Unis.

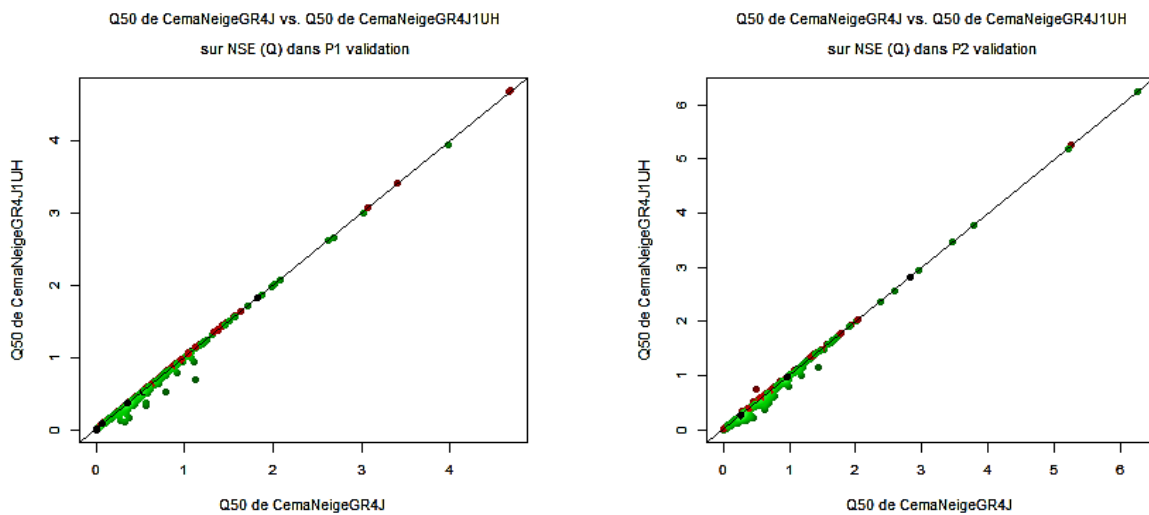


Figure 39 Analyse des débits moyens (Q_{50}) avec critère $NSE(Q)$ des bassins aux États-Unis.

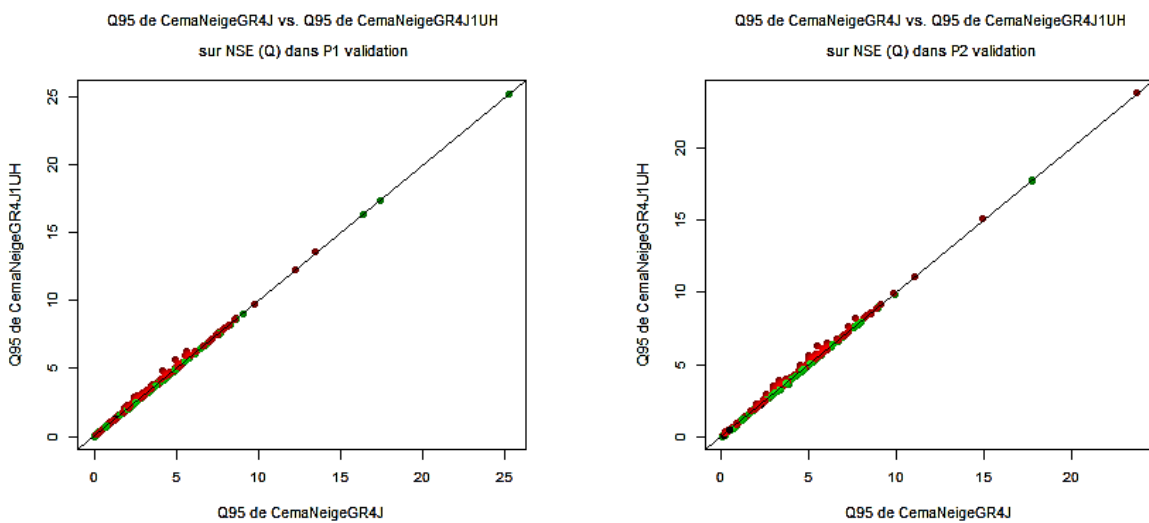


Figure 40 Analyse des hauts débits (Q_{95}) avec critère $NSE(Q)$ des bassins aux États-Unis.

Analyse de coefficient de corrélation pour des bassins en Australie :

Coefficient de corrélation des bassins de l'Australie

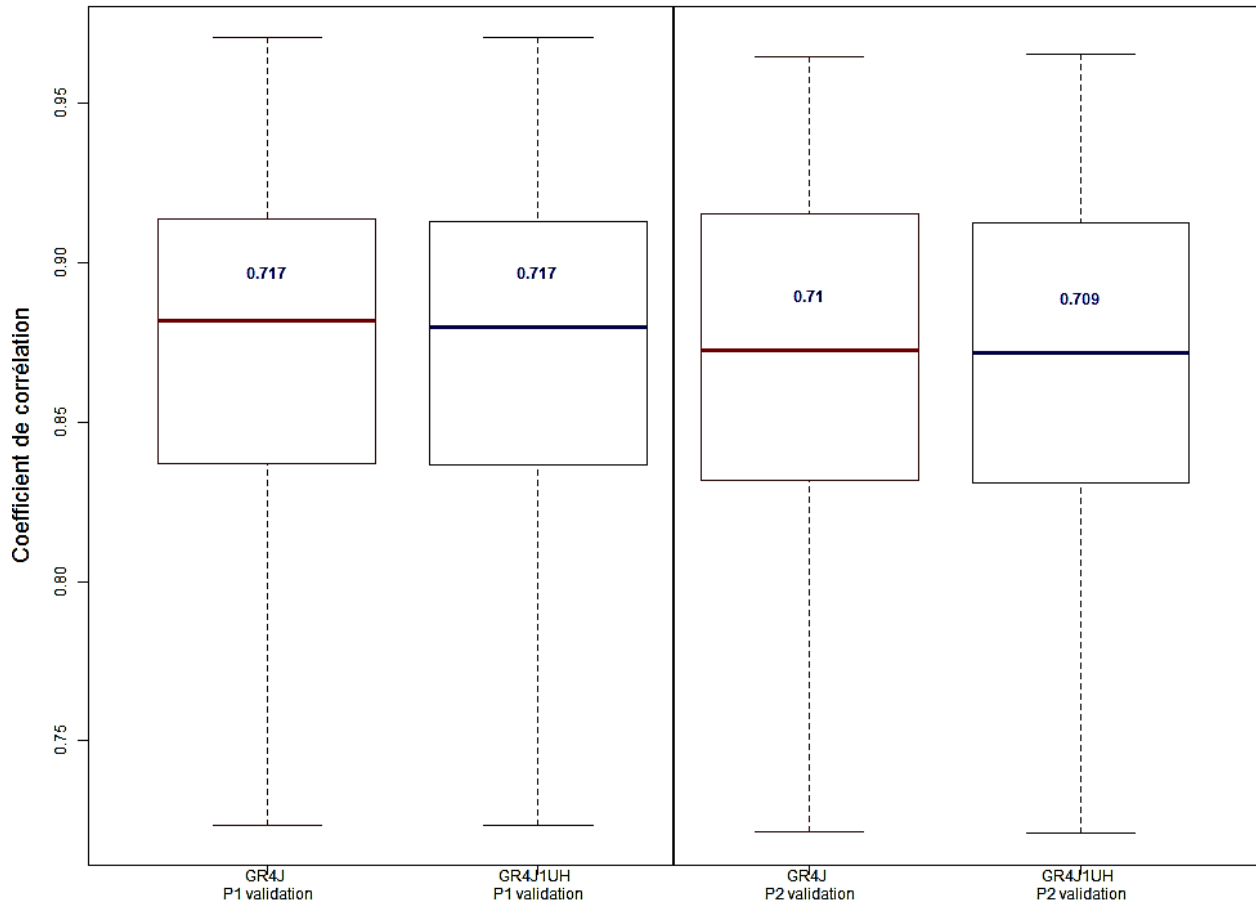


Figure 41 Analyse du coefficient de corrélation avec critère $NSE(Q)$ des bassins en Australie.

Analyse de coefficient de corrélation pour des bassins aux États-Unis :

Coefficient de corrélation des bassins des Etats-Unis

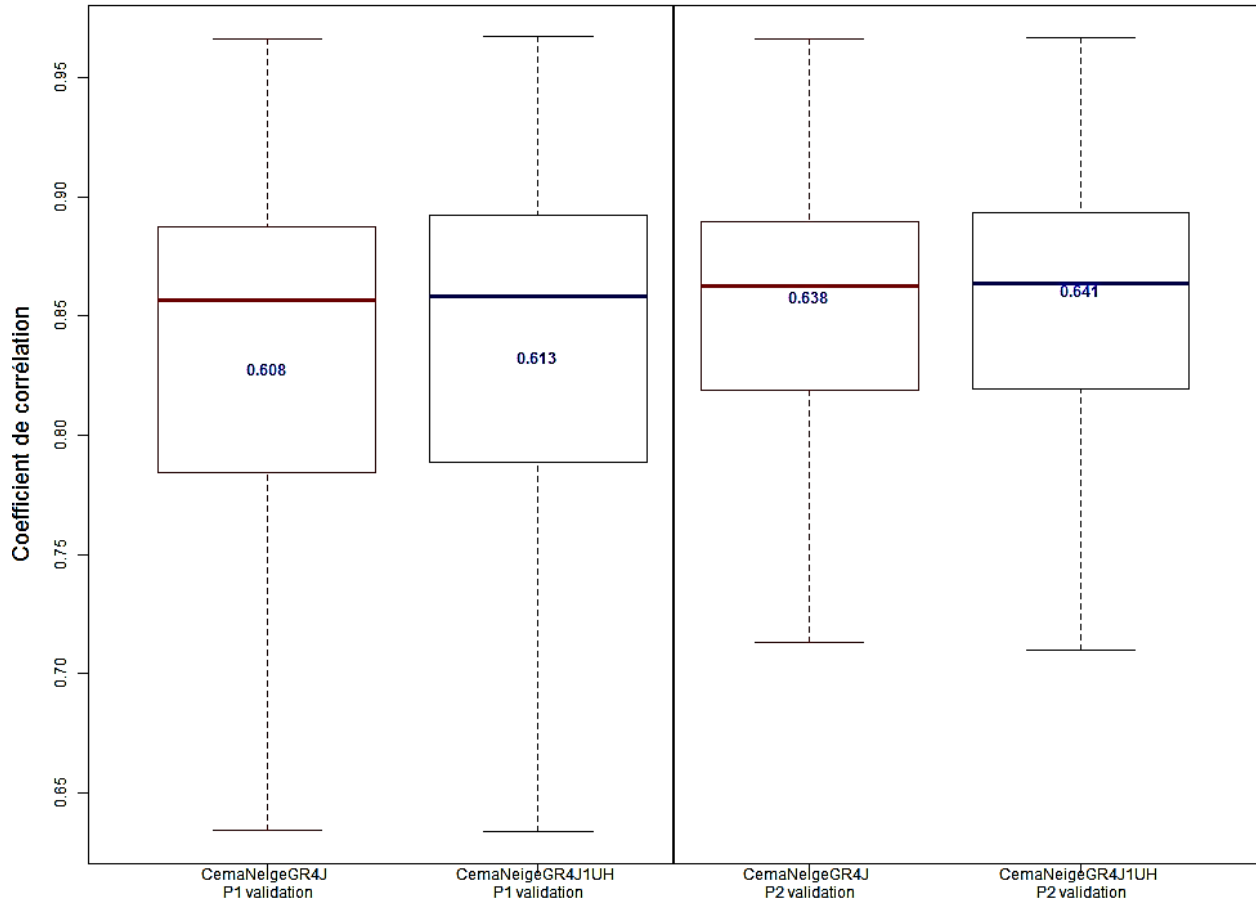


Figure 42 Analyse du coefficient de corrélation avec critère $NSE(Q)$ des bassins aux États-Unis.

Comparaison des performances pour des bassins en Australie :

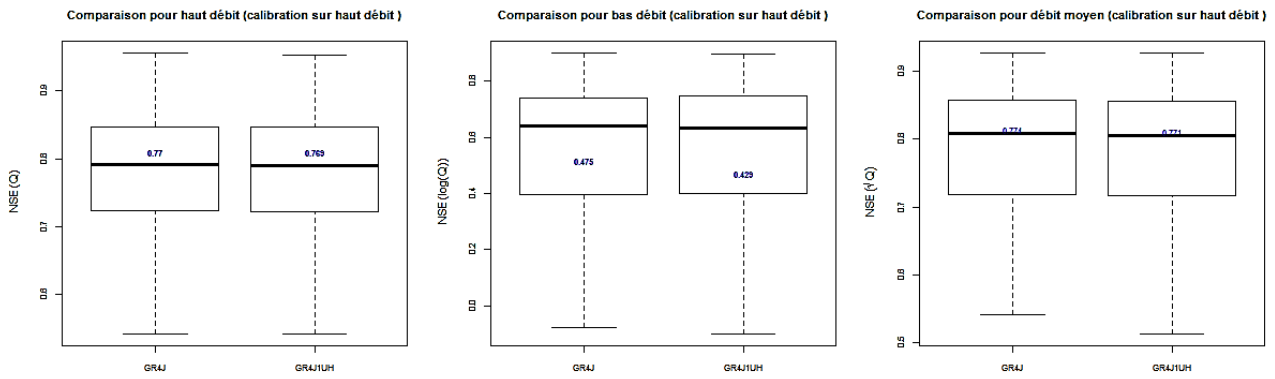


Figure 43 Comparaison des performances NSE avec calibration sur haut débit des bassins en Australie.

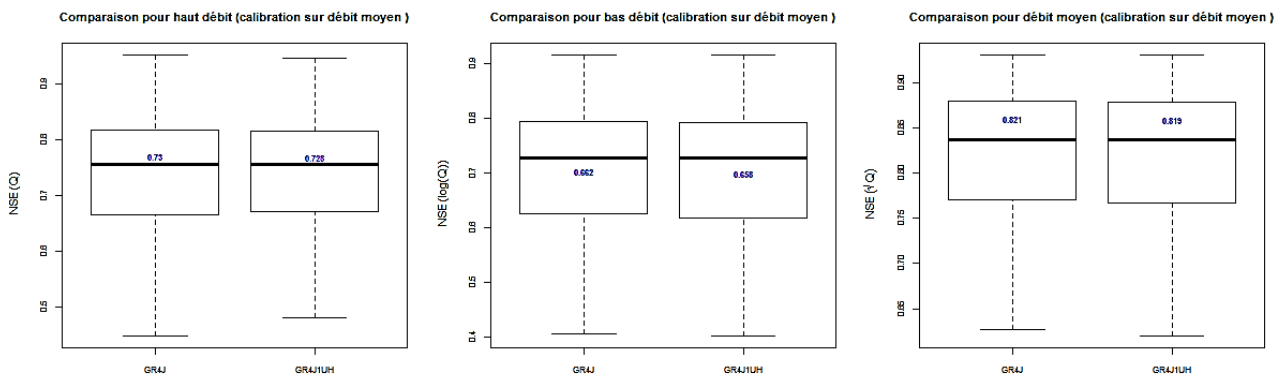


Figure 44 Comparaison des performances NSE avec calibration sur débit moyenne des bassins en Australie.

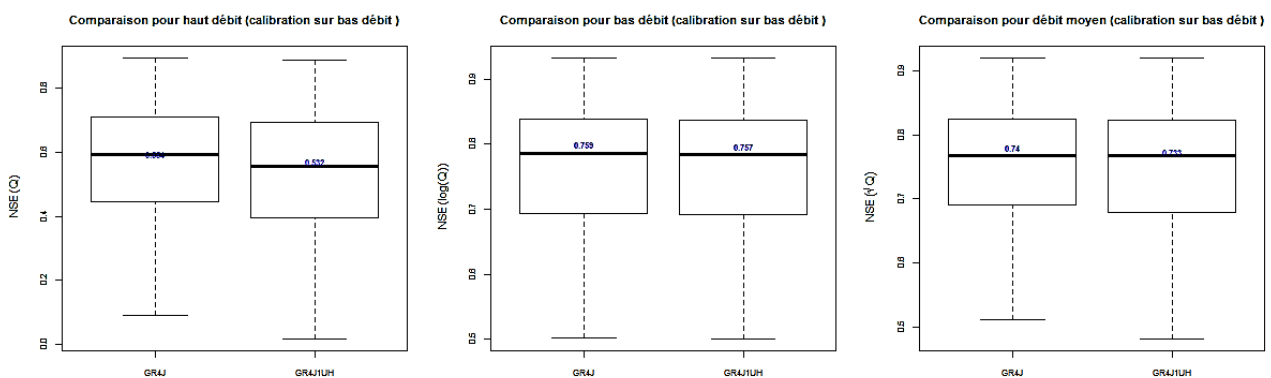


Figure 45 Comparaison des performances NSE avec calibration sur bas débit des bassins en Australie

Comparaison des performances pour des bassins aux États-Unis :

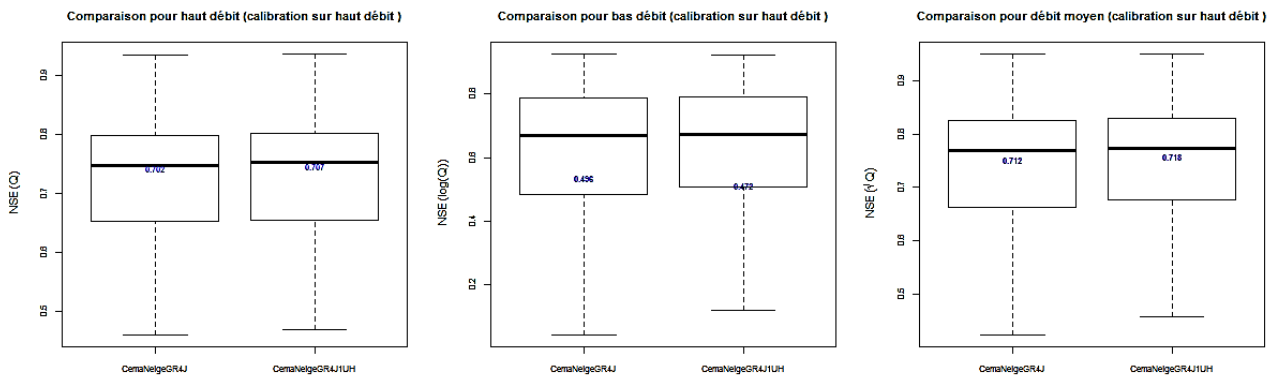


Figure 46 Comparaison des performances NSE avec calibration sur haut débit des bassins aux États-Unis.

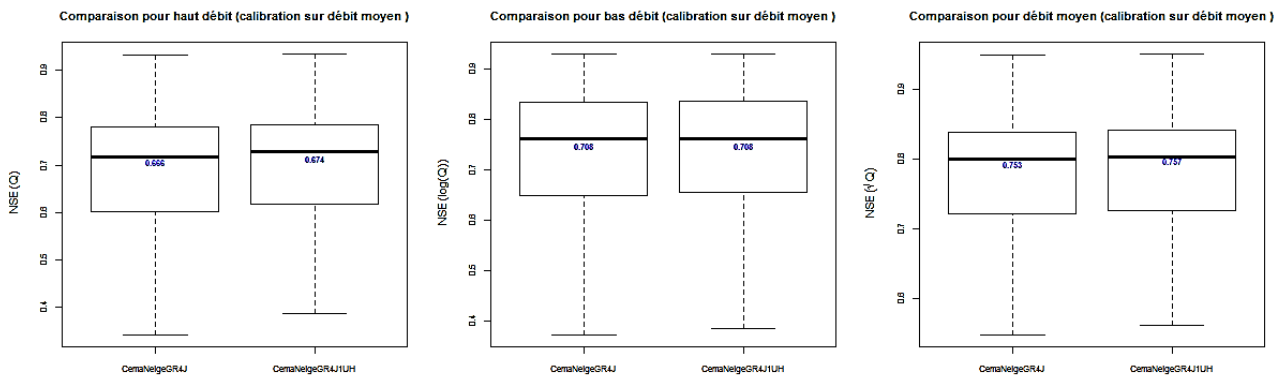


Figure 47 Comparaison des performances NSE avec calibration sur débit moyenne des bassins aux États-Unis.

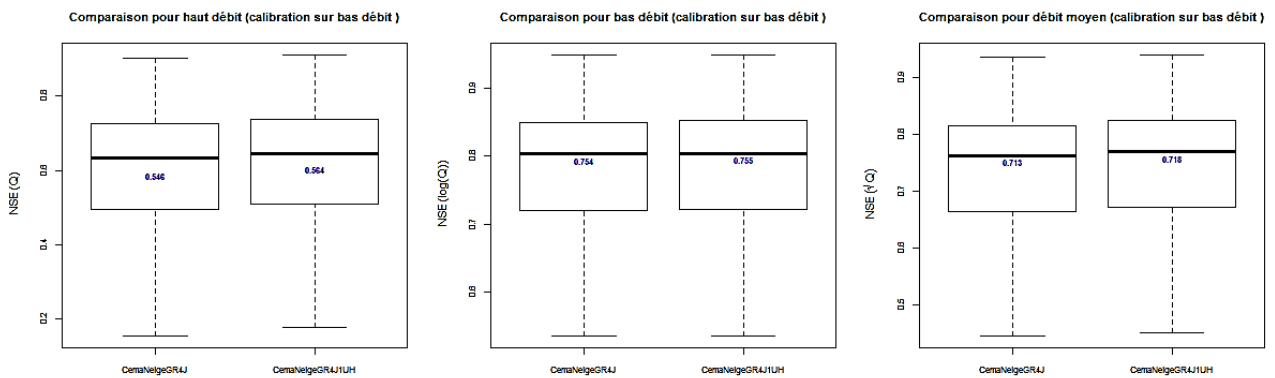


Figure 48 Comparaison des performances NSE avec calibration sur bas débit des bassins aux États-Unis.

Résumé

Les modèles hydrologiques, qui peuvent servir d'outils pour mieux comprendre le comportement des différentes composantes du cycle hydrologique, servent aussi à évaluer l'impact de différents scénarios futurs qui simulent l'évolution climatique, démographique et de l'utilisation des sols sur le cycle de l'eau, en donnant comme résultat des informations pour la gestion durable des ressources en eau, ou par exemple l'anticipation des risques. Cependant, la capacité de la majorité des modèles hydrologiques à reproduire la réalité n'est pas parfaite. Un moyen possible d'améliorer la simulation de flux consiste à utiliser les structures modèles existantes comme point de départ, puis à les modifier progressivement.

Dans ce cadre, le but de ce stage est d'améliorer le package airGR en travaillant avec le modèle GR4J sur un large échantillon de bassins versants avec des conditions hydro-climatiques variées : 605 bassins en France, 209 en Australie et 416 aux États-Unis. airGR est un package R, développé par l'équipe d'Hydrologie des bassins versants de l'IRSTEA d'Antony, qui comprend plusieurs modèles de précipitations appelés modèles hydrologiques GR.

Nous avons fait la comparaison entre des structures à 1 et 2 hydrogrammes unitaires du modèle hydrologique GR4J, lequel a été utilisé seul et couplé avec le modèle degré-jour CemaNeige qui prend en compte l'apport de neige pour une meilleure simulation des débits.

Comme résultats, nous avons obtenu une faible différence entre les moyennes des critères de tous les bassins par les deux modèles. Par rapport à fonctions objectives, on a aussi des valeurs similaires. Concernant l'analyse de chaque bassin, nous avons observés de meilleures valeurs des critères pour GR4J1UH sur les bassins aux États-Unis. Cependant, certains bassins présentent un critère plus faible avec GR41UH. Cela est lié à la surface et les caractéristiques géologiques de bassin. Les bassins avec une surface plus petite présentent des critères plus faibles avec le modèle à un hydrogramme unitaire, c'est aussi le cas pour les bassins qui présentent des systèmes aquifères peu perméables. Grâce à l'analyse des percentiles d'erreurs absolues, nous avons trouvé pour tous les pays, des valeurs similaires pour les deux modèles sur les bas débits, débits moyens, et hauts débits. Nous avons aussi analysé la différence entre les coefficients de corrélation de chaque modèle et nous avons trouvé pour tous les pays, des valeurs similaires pour les deux structures des modèles. Par rapport aux fonctions objectifs, on remarque un meilleur score de qualité avec KGE (plus proche de 1). Nous nous sommes également intéressé aux valeurs des paramètres avant et après modification : elles sont similaires pour les paramètres X_1 , X_2 et X_3 et varient pour X_4 (avec ou sans CemaNeige) ; pour X_4 elles diffèrent davantage. Ces derniers résultats sont cohérents avec la modification portée à la structure du modèle (X_4 étant le temps de base de l'hydrogramme unitaire). Afin de détecter l'influence des modèles sur les performances pour les hauts débits, débits moyennes et bas débits, nous avons comparé les performances pour les hauts débits, débits moyennes et bas débits, initialement calés sur les hauts débits, débits moyennes, et bas débits, en utilisant les critères Nash-Sutcliffe (NSE) et Kling-Gupta (KGE). Nous avons obtenu des valeurs similaires pour tous les pays, dans tous les cas.